

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1919

THÈSE

N° _____

POUR

LE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ

(MÉDECINE)

PAR

HABIBE

HABIBOLLAH OL HOSSEINI

Né le 12 Mai 1890, à Tabriz (Perse)

Médaille de bronze de l'Assistance.

AMPOULES RADIOGÈNES NOUVELLES ET TRANSFORMATEURS

Président : M. DESGREZ, Professeur.

A. MALOINE ET FILS, ÉDITEURS

27, RUE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE, 27

===== PARIS, 1919 =====

A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

A M. SAHEB NASSAG

A mon frère

YOUSSEF MOKARRAMOL MOLK

A Madame J.-A. BLOCK

A MES MAITRES DANS LES HOPITAUX

BÉNÉVOLAT

M. le D ^r ARROU	<i>Hôpital de la Pitié</i>	1911-12
M. le D ^r ENRIQUEZ	» »	1912-13

EXTERNAT .

M. le Professeur KIRMISSON . .	<i>Hôpital des Enfants Malades</i>	1913-14
M. le D ^r HIRTZ	<i>(In Memoriam) Necker</i>	1914
M. le D ^r LERMOYEZ	<i>Hôpital Saint-Antoine</i>	1915

A MM. les Docteurs R. LEDOUX-LEBARD — G. DURAND — G. LUYSS

R. PELLETIER — A. MOULONGUET

A Monsieur le Docteur A. BECLÈRE

Médecin de l'Hôpital St-Antoine
Membre de l'Académie de Médecine
chevalier de la Légion d'honneur

*Dans le service de qui
nous avons rempli les fonctions d'interne*

1915-1917

A notre Président de Thèse :

M. le Professeur DESGREZ

Professeur de chimie organique
et chimie générale.

AMPOULES RADIOGÈNES NOUVELLES

ET

TRANSFORMATEURS

INTRODUCTION

Une véritable révolution s'accomplit dans l'outillage du médecin radiologiste, révolution due à la substitution d'ampoules dites à vide parfait aux ampoules à gaz raréfié, en usage depuis la découverte de Roentgen. Il en résulte une grande simplicité de technique qui, jointe à l'extension des applications des rayons X à toutes les branches de la médecine, ne permet plus de les considérer comme une spécialité difficilement abordable, tout au moins en ce qui concerne le radiodiagnostic. Les tubes nouveaux et les transformateurs qu'ils ont permis de réaliser, mettent aujourd'hui, pour ainsi dire, sans apprentissage, la technique radiologique à la portée de tout praticien. Aussi, nous a-t-il semblé utile de faire une étude de ces ampoules et de réunir tous les documents épars les concernant.

Pour mieux faire ressortir les qualités de ces tubes, en saisir le fonctionnement et pouvoir opposer l'un à l'autre les deux types d'ampoule, nous avons cru devoir faire précéder ce travail d'une étude générale des ampoules à gaz raréfié, des rayons cathodiques et des rayons de Roentgen.

Quand dans un tube ou poire de verre, muni d'électrodes à ses extrémités, on cherche à faire passer un courant, on observe divers phénomènes, en relation étroite avec la pression du gaz contenu dans le tube. Tout au début, alors que la pression est la même que celle du milieu atmosphérique, on constate une certaine résistance au passage du courant, passage qui a lieu sous forme d'étincelles. Si l'on vient à diminuer la pression, cette résistance diminue avec elle jusqu'à une certaine valeur, atteint ainsi un minimum à partir duquel elle remonte au fur et à mesure que le vide est poussé plus loin. Il arrive un moment enfin où le degré de vide du tube s'oppose à toute décharge.

Si, pendant que l'on procède à ces expériences, on se place dans de bonnes conditions d'obscurité, on observe que la poire de verre prend divers aspects optiques, qui varient d'ailleurs non seulement avec la pression, mais aussi avec la forme et les dimensions du tube, et la disposition des électrodes.

Pour une bobine puissante, et avec l'usage d'interrupteurs rapides, la décharge se fait sous forme d'étincelles brillantes, nourries et éclatant avec bruit. Cette décharge peut même donner lieu à une véritable

flamme, brillamment lumineuse et apparemment continue. C'est ce qui se passe dans les lampes à arc, à la pression ordinaire.

Avec l'abaissement de la pression, la décharge change d'aspect. Peu à peu les étincelles se réduisent à des effluves, puis le tube paraît simplement lumineux; cette lumière, d'un rayonnement qui peut être très intense (Tube de Geissler, $P = 2-3$ mm. de Hg) et de couleur variable selon le gaz, part de l'anode (lumière anodique) et s'arrête par affaiblissement progressif à une petite distance de la cathode. On distingue alors au voisinage de cette électrode, quand la pression est de 1,5 à 1 mm. environ, un espace sombre appelé *espace sombre de Faraday*. — Cette lumière positive disparaît à son tour, tandis qu'une autre, lumière négative, d'intensité toujours moindre, prend naissance au niveau de la cathode. Celle-ci se divise en deux faisceaux séparés par un nouvel espace obscur, *espace sombre de Hittorf* qui s'étend au fur et à mesure que la pression baisse. C'est ainsi enfin que quand la pression atteint la valeur de un micron (Crookes 1879), l'ampoule, devenue obscure sur presque toute son étendue, laisse apparaître sur sa paroi opposée à la cathode, une belle phosphorescence, verte ou jaune-verdâtre avec le verre ordinaire. Cette phosphorescence varie de couleur avec la nature du verre employé à la confection du tube. Elle est provoquée par des rayons invisibles, prenant naissance dans l'espace de Hittorf et la gaine lumineuse qui enveloppe la cathode, et dénommés par Wiedmann *rayons cathodiques*.

Quand le tube est à ce degré de vide, révélant le phénomène cathodique, on le nomme *tube de Crookes*. A un degré encore plus prononcé, et aux approches du

vide absolu, toute décharge, comme nous l'avons mentionné, devient impossible. Le courant ne passe plus.

Il découle de ce qui précède que la décharge électrique dans un gaz raréfié n'est aucunement comparable au passage de l'électricité dans un conducteur, et le mot résistance n'a plus l'acception qu'on lui donne dans le cas d'un circuit entièrement métallique, et nous verrons que tant que la différence de potentiel entre les électrodes reste inférieure à une certaine valeur, variable avec la nature et la pression du gaz, la disposition des électrodes, etc., il ne passe aucun courant.

Rayons cathodiques. — Dans cette ampoule de Crookes, les rayons cathodique, découverts par Hittorf en 1868, constituent un faisceau présentant un aspect variable suivant le degré de vide du tube et la forme de la surface de l'électrode qui les émet, indépendamment de sa nature.

Ils partent toujours normalement à cette surface, se dirigent en ligne droite, et leur observation ne devient possible que grâce à la fluorescence du gaz résiduel qu'ils provoquent. Si on emploie une cathode à surface plane, le faisceau est cylindrique et creux; convergeant, en forme de cône également creux, pour une surface concave, et divergeant pour une surface convexe.

Hittorf a montré que la situation de l'anode n'influe nullement sur la direction de ces rayons; et, quelle que soit sa position, le faisceau cathodique se montre toujours normal à la surface de la source qui les émet.

Propriétés. — Les rayons cathodiques étant invisibles par eux-mêmes, on a recours pour leur observation à leur propriété d'exciter la fluorescence du gaz résiduel du tube, ou la phosphorescence de certains corps. Elle prend une couleur verte pour le cristal à base alcaline, bleue, s'il est à base de plomb. D'autres corps sont encore sensibles à cette influence : craie, sulfure de zinc. Cette phosphorescence perd de son intensité à mesure que le corps frappé par les rayons s'échauffe. C'est ainsi qu'elle est nulle pour le verre à $+ 230^{\circ}$.

Propriétés chimiques. — Certains sels, en particulier les sels alcalins et alcalino-terreux, se colorent sous l'action de ces rayons. Leur coloration disparaît rapidement à la lumière du jour, mais très lentement ou pas du tout à l'obscurité. C'est ainsi que le platino-cyanure de baryum brunit (effet Villard) de même que le NaCl; le KBr devient bleu, etc...

Ils sont également réducteurs : oxyde de cuivre, silicate de plomb, sels de manganèse.

Propriétés calorifiques. — La paroi de l'ampoule sur laquelle ces rayons viennent frapper ne tarde pas à s'échauffer et même à fondre, pour peu que le fonctionnement du tube se prolonge. La température peut atteindre, au point de choc de l'obstacle placé sur leur trajet, celle du four électrique : 3.600° . Ce ne serait d'ailleurs là qu'une limite inférieure.

Propriétés mécaniques. — Si l'on place un objet mobile, un moulinet en mica par exemple, sur le trajet de ces rayons, on le voit se déplacer, tourner rapide-

ment autour de son axe (Crookes). De plus, si l'obstacle est fixe, l'anticathode par exemple, il ne tarde pas à être embouti sous l'influence du bombardement moléculaire joint à l'élévation de la température. Nous verrons plus loin ce qu'il faut entendre par bombardement moléculaire.

Propagation rectiligne. — La trajectoire rectiligne de ces rayons se démontre par un dispositif très simple. Si, dans un tube de Crookes, on oppose un obstacle au passage du faisceau cathodique, obstacle moins large que ce faisceau, sur la paroi opposée à la cathode, devenue phosphorescente, on distingue nettement une ombre dessinant la forme de l'objet. C'est une ombre portée. La mesure de ses dimensions montre qu'elle correspond à une source de rayons rectilignes.

Déviation sous l'influence du champ magnétique. — Si on soumet le faisceau cathodique à l'influence d'un champ magnétique, on le voit s'infléchir. Il en est de même pour la lumière positive, mais tandis que le faisceau cathodique conserve l'inflexion subie, celle-ci reprend sa direction première.

Diffusion, réflexion et réfraction apparentes. — Goldstein a montré que les rayons cathodiques ne subissent pas la réflexion régulière; ils se diffusent en rencontrant un obstacle, si même c'est l'anode comme dans les tubes à focus. L'obstacle étant autre que l'anode, ils donnent naissance à un faisceau secondaire, avec espace obscur de Hittorf (J. Perrin), exactement à l'endroit frappé et quelle que soit sa position.

Il s'agit d'une émission nouvelle par pseudo-réflexion, et toujours normale à la surface de l'obstacle. Si la cathode principale en est rapprochée, elle fait dévier ce faisceau. On observe en outre, si l'obstacle est une lame mince, un autre faisceau partant de sa face postérieure et normalement à celle-ci. Ce dernier a les mêmes propriétés que le faisceau principal.

Nature des rayons cathodiques. — Ce fut Crookes qui émit la première hypothèse sur la nature de ces rayons. Reprenant les idées de Newton sur l'émission, et en s'inspirant de sa propre expérience sur le moulinet, il crut pouvoir les assimiler à un flot de corpuscules s'écoulant plus ou moins rapidement, à partir de la cathode, et faisant ainsi subir un déplacement à l'obstacle rencontré, par une sorte de *bombardement moléculaire*.

Nous ne croyons pas devoir rappeler les discussions que suscita cette hypothèse entre partisans et adversaires qui assimilaient ces rayons aux radiations vraies, c'est-à-dire de nature vibratoire.

Il était difficile de concilier les caractéristiques de ces rayons, en particulier le transport d'électricité, révélé par leur déviation dans le champ magnétique et la charge négative communiquée à l'électroscope, avec une nature vibratoire.

Quelque temps après, la découverte des rayons de Röntgen, et ultérieurement des corps radioactifs, spécialement du radium, vint rallier tous les esprits autour d'une hypothèse nouvelle, de portée autrement considérable.

J.-J. Thomson, en se servant de la propriété du faisceau cathodique de se laisser dévier par l'aimant,

parvint à calculer la vitesse que peuvent acquérir les corpuscules constitutifs de ces rayons. Il calcula que cette *vitesse*, qui est *fonction de la différence de potentiel entre les deux électrodes*, peut varier entre 20.000 et 150.000 km. à la seconde. D'autre part, ce savant, Simon, Wiechert, Kaufmann arrivèrent à estimer la charge de ces corpuscules, charge négative et constante, quel que soit le gaz.

Il en fut conclu que les particules cathodiques ne sont pas, comme on l'avait antérieurement supposé, des particules matérielles, des particules gazeuses chargées d'électricité négative, en un mot, des ions négatifs, mais que ce sont des particules négatives, des ions négatifs, détachés et séparés des particules matérielles auxquelles elles appartenaient, bref que ce sont des grains ou *des atomes d'électricité négative*. Ces atomes d'électricité négative les physiciens les appellent plus brièvement des électrons négatifs, ou, plus brièvement encore des *électrons*.

Il a été calculé que *la charge électrique* d'un électron équivaut exactement à la charge électrique d'un atome d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau. Fait plus imprévu encore, *la masse* d'une particule cathodique se trouve être 1.800 fois plus petite que la masse d'un atome d'H, c'est-à-dire que la plus petite masse matérielle connue, *quelle que soit d'ailleurs la nature chimique du gaz résiduel du tube*.

On se rendit également compte que le faisceau cathodique n'est pas homogène en tant que vitesse corpusculaire, ce qui explique la déviation inégale des rayons par l'aimant. Cette hétérogénéité serait, d'après Villard, dûe à ce que chaque décharge de la bobine met en mouvement une série de corpuscules animés de vi-

tesses différentes, phénomène lui-même dû à la complexité de la décharge de la bobine d'induction se faisant par flux distincts et inégaux. Strutt a en effet montré qu'avec une décharge constante, homogène : batterie d'accumulateurs, le faisceau est également homogène.

AMPOULE DE CROOKES

Étude électrique de l'ampoule. — Pour qu'un courant parvienne à traverser un gaz, il faut que la différence de potentiel entre les deux électrodes atteigne une certaine valeur, au-dessous de laquelle la décharge ne peut se faire. Cette valeur minima qui représente la résistance électrique de l'ampoule, c'est le potentiel explosif qui se mesure le plus communément avec l'étincelle équivalente. Ce minimum est particulier à chaque gaz. Il en constitue une caractéristique et ne dépend ni de la distance des électrodes ni de la pression.

Aussitôt que la décharge s'établit, il se fait une distribution de potentiel dans le tube, avec une brusque chute près de la cathode, très forte aux basses pressions. Cette chute varie avec la nature du gaz et le métal de l'électrode.

Fonctionnement de l'ampoule. — Quand on met en marche une ampoule de Crookes et qu'on la fait fonctionner un certain temps, on remarque que la décharge a de plus en plus peine à se faire; la résistance augmente. Tout se passe comme si le vide était poussé automatiquement. Il en est effectivement ainsi. Le vide se

fait de plus en plus pendant le fonctionnement de l'ampoule, par fixation des molécules gazeuses libres par les électrodes et les parois. Il suffit, pour s'en convaincre et rendre la liberté à ces molécules, de chauffer extérieurement les parois à l'aide d'une flamme de bec Bunsen ou de lampe à alcool ; en langage technique, c'est *donner le coup de torchon*. Immédiatement la décharge qui était arrêtée, se rétablit.

Cet inconvénient qui raccourcit beaucoup la vie des ampoules, avait frappé les premiers expérimentateurs ; et, Hittorf avait remarqué qu'en chauffant un fragment de potasse, inclus dans une ampoule à vide trop poussé, la décharge se rétablissait par suite de dégagement de vapeurs d'eau par la potasse.

Osmo-régulateur. — Cailletet et Deville ayant démontré la perméabilité à l'H du platine porté au rouge blanc, Villard en profita pour construire son osmo-régulateur. C'est un tube de platine fermé à l'une de ses extrémités et ajusté par l'autre à l'ampoule. Le vide le plus parfait ayant été fait, il suffit de le chauffer au rouge blanc, pour y faire pénétrer, par osmose, de l'hydrogène absolument pur, provenant de la dissociation qui se fait au niveau de la flamme.

C'est là un moyen aussi commode que simple pour obvier à cet inconvénient de *durcissement* et un des plus grands perfectionnements apportés à la confection de l'ampoule.

Le phénomène inverse : *ramollissement*, se produit aussi quelquefois. Il est dû à la brusque mise en liberté du gaz, retenu par les parois et les électrodes. Il n'y a qu'à laisser fonctionner l'ampoule, pour qu'en durcissant, elle atteigne le degré de vide voulu. On peut ce-

pendant avoir recours encore à l'osmo-régulateur, quoique le procédé ne soit pas couramment employé. Il suffit d'engainer le tube de platine ajusté à l'ampoule, d'un autre tube de platine plus large. En portant celui-ci au rouge sombre, l'osmose se fait dans le sens inverse. On procède ainsi à une soustraction de gaz.

II

Un jour, pendant qu'il procédait à des expériences, Roentgen eut l'attention attirée par la vive luminosité présentée par des paillettes de platino-cyanure de baryum, placées à une assez grande distance d'une ampoule de Crookes en marche. Ayant sans peine éliminé l'action des rayons cathodiques, il en vint à chercher la cause de cette luminescence. Ses expériences l'amènèrent à admettre que l'ampoule de Crookes avait une propriété jusque-là méconnue : celle d'engendrer un rayonnement d'une nature indéterminée et qui, en frappant le platino-cyanure de baryum, le rend lumineux. Il constata, par ailleurs, que le sulfure de calcium possède la même caractéristique.

Il poursuivit ses recherches en vue de déterminer la nature et les propriétés de ces rayons nouveaux. Devant le résultat négatif de ses tentatives de les assimiler à un type de rayonnement connu, des rayons lumineux en particulier, il les dénomma *Rayons X*.

Une grande découverte, ouvrant des horizons nouveaux à la physique et à l'art médical, venait d'être faite. Décembre 1895.

Roentgen n'avait pu, avons-nous dit, ramener ces rayons à aucun type déjà connu. Il constata, en effet, qu'ils ne jouissaient d'aucune des propriétés des on-

dulations lumineuses : réfraction, réflexion, polarisation..., etc. Ils n'étaient pas davantage sensibles, comme les rayons cathodiques, à l'action du champ électro-magnétique, et ne présentaient pas le phénomène d'interférence. Ils avaient, d'autre part, la curieuse propriété de décharger, par simple influence de voisinage, sans l'atteindre, tout corps chargé électriquement, quel qu'en fût le signe. L'opacité enfin, telle qu'on la conçoit pour les rayons lumineux, n'existait pas pour ceux-là. Ils traversaient le carton noir, le bois, l'ébonite, les métaux mêmes ne dépassant pas une certaine épaisseur.

Ayant eu l'idée de placer sa main entre l'ampoule et un morceau de carton recouvert d'une pâte au platino-cyanure de baryum, il vit au milieu d'un champ clair se dessiner en sombre le contour de sa main, et mieux encore, les détails anatomiques du squelette. Ayant remplacé le carton par une plaque photographique, il retrouva la même configuration sur le cliché. Il montra ainsi l'application ingénieuse que l'on pouvait faire de sa découverte, et nous initia du même coup à la *radioscopie* et à la *radiographie*.

Quant à leur origine, il fallut bien admettre que, conformément au principe de la conservation de l'énergie, le faisceau cathodique, en venant s'amortir sur la paroi de l'ampoule, libère son énergie, en partie sous forme chimique et calorique, et en partie, sous forme d'une énergie nouvelle : rayonnement X.

Il nota effectivement que ces rayons prenaient naissance seulement sur la partie phosphorescente du verre, et de plus, que le phénomène de la transparence semblait être en relation directe avec la densité des corps.

La découverte de Roentgen eût un retentissement mondial. Le progrès réalisé dans le domaine physique pour l'étude de la décharge électrique, ne frappa guère les esprits autant, et à juste raison, que le procédé nouveau d'investigation auquel il donnait lieu. C'était en somme la découverte de l'autopsie vivante, de la véritable *sthétoscopie*, dans son sens éthymologique (je vois dans l'intérieur), comme a dit M. Becquère, si Laënnec ne s'était servi de ce mot pour rendre célèbre l'instrument de son invention.

Peu de temps après, on s'aperçut que ces rayons produisaient des lésions sur les parties les plus exposées du corps de ceux qui les maniaient (mains). L'application de cette nouvelle propriété à la thérapeutique créait bientôt la *radiothérapie*.

ETUDES DES RAYONS DE ROENTGEN

Nature des rayons X. — Comment classer les rayons X, appelés aussi rayons de Roentgen ? Où les placer dans l'échelle des radiations ?

Il y a peu de temps encore, on ignorait tout de ces rayons, et on se contentait de les opposer aux rayons lumineux dont ils ne paraissaient jouir d'aucune des propriétés. Ce qui empêchait de les ranger dans la catégorie des rayons ondulatoires, avec preuves scientifiques à l'appui, et d'en étudier comme tels les propriétés : réflexion, diffraction, etc., ce n'était point une différence de nature, mais bien la défectuosité des moyens d'étude et de l'outillage employé.

Nous ne rappellerons pas les discussions et les hypothèses émises sur la nature de ces rayons qu'on

est d'accord, aujourd'hui, à assimiler aux radiations vraies. L'étude que nous ferons de leur propriété en sera la preuve.

Ces rayons, comme toute radiation vraie, se transmettent en ligne droite, sous forme d'ondes sphériques, ou, si l'on veut, d'une pulsation comparable à un front d'onde sphérique ; comme pour les rayons lumineux, *l'intensité d'irradiation est fonction inverse du carré de la distance.*

Diffraction et interférences. — Pour étudier la réflexion, il faut disposer d'une surface polie qui réfléchisse les rayons sans leur faire rencontrer d'obstacles, d'aspérités, à son propre niveau. Ceci est aisé pour les rayons lumineux, dont, nous le savons, la longueur d'onde est de l'ordre de quelques dix millièmes de millimètre. Mais il est compréhensible que si cette surface, si polie soit-elle, a des aspérités de même grandeur que la longueur d'onde, infiniment petite, du rayon à étudier, celui-ci viendra s'éteindre, se trouvera arrêté sur ces aspérités ; il n'y aura pas de rayon réfléchi. C'est précisément ce qui se passait dans les expériences ayant pour but d'étudier les propriétés optiques des rayons de Roentgen.

Von Laue et ses élèves, Friedrich et Knipping, en 1912, puis les deux physiciens anglais, Bragg père et fils, tentèrent de résoudre le problème, en prenant comme surface réfléchissante un fragment cristallin, dont les éléments constitutants frappés par les rayons de Roentgen, fonctionnent comme les centres de diffraction, disposés suivant les nœuds du réseau cristallin. Il faut noter qu'il s'agit là d'un réseau

à trois dimensions, par conséquent différent des réseaux optiques.

Pour produire des effets de diffraction sensibles, les éléments du réseau doivent être à l'échelle des longueurs d'onde ; dans le cas des cristaux, l'espace-ment des éléments du réseau est de l'ordre des distances moléculaires dans les corps solides, distances qui seraient au moins mille fois inférieures au milliè-
me de millimètre, d'où l'on déduit que la lon-
gueur d'onde des rayons de Rœntgen, réduite dans
les mêmes proportions vis-à-vis de celles de la lu-
mière, serait de l'ordre de quelques dix millionièmes
de millimètre.

Nous ferons de larges emprunts, pour l'exposé
de cette question, au travail de M. de Broglie (1), qui,
avec Mosely, a été un des initiateurs à la nouvelle
spectroscopie qui a pris naissance, grâce aux travaux
des Bragg père et fils.

Les deux physiciens anglais ont montré qu'un
faisceau de rayons X, tombant sur une surface cris-
talline, donne un rayon réfléchi ; mais, à cause d'un
phénomène d'interférence, l'angle d'incidence égal
toujours à l'angle de réflexion, impose ici la longueur
d'onde. Donner l'incidence, c'est donner la longueur
d'onde.

Un cristal peut être envisagé comme un ensemble
de plans réticulaires diversement inclinés. S'il est frappé
par un pinceau^e étroit^e de rayons X, il en résultera
une série d'images réfléchies, chaque plan réticulaire
donnant la sienne, lorsque les longueurs d'onde ont
des valeurs convenables. C'est cet ensemble symétrique

(1) M. de Broglie. *Revue scientifique*, n° 23, 1915, p. 577.

d'images réfléchies que les expériences de von Laue ont permis pour la première fois d'observer.

M. de Broglie dispose une face cristalline, mobile autour d'une axe, de façon que le faisceau de rayons X, diaphragmé par une fente étroite, vienne la frapper sous une incidence variable à volonté, et reçoit les rayons réfléchis sur une plaque photographique. Il obtient de la sorte un véritable spectre de rayons X, A chaque incidence correspond un pinceau de rayons homogène et de longueur d'onde bien déterminée. Il se révèle alors sur le cliché une tache noire centrale, c'est la trace du faisceau incident et de chaque côté un spectre. La disposition symétrique de ces deux images permet pour chaque raie la mesure de la déviation, c'est-à-dire de la longueur d'onde.

Comme dans les spectres normaux, les radiations les plus déviées sont celles dont la longueur d'onde est la plus grande. Le rayon X est d'autant plus pénétrant que la longueur d'onde est plus courte; les radiations qui correspondent aux bandes avoisinant la tache centrale traversent aisément des épaisseurs notables d'aluminium. Ce pouvoir de pénétration diminue rapidement et, pour peu que l'on s'éloigne de la tache centrale, les radiations enregistrées peuvent à peine traverser le verre de l'ampoule.



Ces spectres caractérisent avant tout la matière constitutive de l'anticathode et tout paraît indiquer qu'ils la caractérisent d'une façon atomique, c'est-à-dire indépendamment des liaisons chimiques qui peuvent intervenir. On pourrait objecter que l'anticathode est

le siège d'un bombardement qui élève sa température et tendrait à la dissocier, de sorte que l'influence des liaisons chimiques ne se manifesterait pas simplement, parce que celle-ci serait brisée au moment de l'émission. Cette objection ne semble pas devoir être prise en considération, car les anticathodes énergiquement refroidies donnent sensiblement les mêmes spectres que celles fonctionnant à température élevée. Du reste les spectres obtenus par émission secondaire paraissent bien trancher la question.

L'extrême petitesse des longueurs d'onde permet de conclure que les forces de liaison sont ici bien plus considérables que celles qui font osciller des vibreurs auxquels correspondent les raies lumineuses. Il s'agit donc vraisemblablement de la vibration de constituants de l'atome plus intimes qu'aucun de ceux que l'on avait pu atteindre jusqu'à présent.

Diffusion. — En traversant un corps les rayons X se comportent comme un faisceau de lumière traversant une épaisseur de brouillard; ils possèdent encore les caractéristiques de leur origine, mais ont subi une diffusion. — *La diffusion est proportionnelle à l'épaisseur et au poids atomique de la substance traversée, et aussi, proportionnelle au pouvoir pénétrant des rayons.*

Lorsque ces rayons frappent un corps, ce corps devient lui-même une source de *rayons X secondaires*. Il se forme ainsi un faisceau secondaire complexe.

Rayons X secondaires. — M. Sagnac, qui a découvert les rayons secondaires des rayons de Roentgen, a montré que les corps frappés par des rayons X émettent à leur tour des radiations qui, pour une part au moins,

diffèrent profondément des rayons excitateurs. Barkla, Sadler, Whiddington montrèrent que ces rayons secondaires paraissent à peu près homogènes et en tout cas tout à fait différents en passant d'un radiateur à un autre (Cu, Fe, Cu et Ag).

Barkla distingue deux séries de rayons secondaires qu'il a appelées la série K et la série L.

En examinant les éléments dans l'ordre des poids atomiques croissants pour déterminer le pouvoir de pénétration de leurs rayons secondaires, on constate que pour les corps simples qui précèdent l'aluminium (poids atomiques 28), aucun rayonnement secondaire n'est encore appréciable. Puis, à partir de ce corps, chaque élément donne un rayonnement secondaire dont la pénétration croît d'une façon régulière avec le poids atomique. Cette série ainsi définie est la série K de Barkla et la détermination a été faite jusqu'au Lanthane.

En continuant l'examen des corps en fonction de leur poids atomique croissant, on retrouve des radiations peu pénétrantes qui présentent à partir de l'argent (108) une allure parallèle à celle des rayons K et qui deviennent comme eux de plus en plus pénétrants à mesure que le poids atomique augmente. Cette nouvelle suite c'est la série des rayons L.

De même que pour les rayons secondaires dont le pouvoir de pénétration croît avec le poids atomique du corps radiant, des anticathodes à poids atomique élevé : tungstène, platine, donnent des rayons pénétrants, de petite longueur d'onde, en dehors, bien entendu, des variations du degré de vide de l'ampoule. Avec ces anticathodes en tungstène ou platine, on se trouve dans la série L, et plus le poids atomique de l'élément aug-

mente, les raies spectroscopiques se déplacent vers les courtes longueurs d'onde. Les radiations de la série L sont toujours plus complexes que celles de la série K qui comprend généralement deux raies dont la plus intense est celle qui correspond à la plus grande longueur d'onde. La série L présente d'autre part un pouvoir de pénétration 300 fois moindre que la série K (1).

Polarisation (2). — Barkla (3) et Ilaga (4) ont montré que les rayons secondaires émis par diverses sub-

(1) D'après sir J.-J. Thomson (*Théorie Atomique*. Trad. franc. par Ch. Moureu), les électrons forment autour du noyau de l'atome des couches concentriques comme les enveloppes d'un oignon, séparées les unes des autres par des distances finies ; le nombre de ces couches dépendant du nombre d'électrons dans l'atome et partant, de son poids atomique. A mesure que le nombre d'électrons de l'atome augmente, ces électrons viennent s'ajouter à la première et unique couche ; mais une fois le nombre critique atteint tout nouvel électron ajouté à l'atome commence à former une nouvelle couche externe, l'ancienne devenant interne. Avec l'addition de nouveaux électrons le même processus se répète et une nouvelle couche se forme, et ainsi de suite.

Sir J.-J. Thomson trouve entre autres une confirmation à cette manière de voir dans les expériences, de Barkla. D'après ce physicien, les deux radiations *k* et L de Barkla répondent aux radiations émises par deux couches différentes d'électrons, les radiations *k* les plus dures provenant de la couche interne et les radiations L, les plus molles de la couche externe. Il laisse prévoir en outre qu'il se pourrait que dans les corps à poids atomiques élevés, on décèle bientôt une troisième série de radiations provenant d'un troisième anneau d'électrons, qui comblerait le vide qui existe actuellement dans le tableau spectrographique au delà des rayons de Lyman et Schumann.

(2) Zimmern et Guilleminot. *Journ. de Rad.*, n° 1, 1914.

(3) *Phil. Mag.*, juin 1909.

(4) *Proceed. Ac. Sc. Amsterdam*, août 1906.

stances présentent des signes révélateurs de polarisation dans un méridien donné.

Un des dispositifs dont ils se sont servis est le suivant : K est une lame de charbon qui reçoit à 45° environ le rayonnement primaire R donné par un tube. Le charbon émet abondamment des rayons secondaires et ces rayons sont surtout composés de rayons primaires diffusés et peu de rayons homogènes.

On fait tomber un faisceau de ces rayons secondaires sur un charbon cylindro-conique C placé dans un

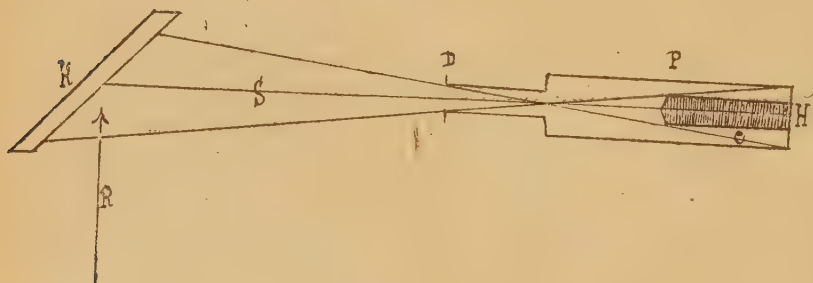


Fig. 1.

manchon protecteur P muni d'un diaphragme D et convenablement disposé suivant l'axe du faisceau S. Dans ces conditions, on observe au bout d'une soixantaine d'heures qu'une pellicule photographique enroulée à l'intérieur de P et appliquée contre ses parois de manière à ne recevoir que le rayonnement tertiaire émis par le charbon C, présente deux maxima d'impression à 90° .

Ces maxima et ces minima ne peuvent tenir qu'à une certaine polarisation du rayonnement secondaire car le charbon C est symétriquement irradié. Il est facile de contrôler cette symétrie d'irradiation en recueillant l'impression photographique directe du rayon-

nement secondaire en H. La tache développée est parfaitement uniforme. Si au contraire on envoyait sur C le rayonnement primaire R on n'observerait aucun maximum ni minimum sur la pellicule P.

Des recherches analogues faites par Bragg, Madsen, puis Kleeman, sur les rayons secondaires des rayons γ du radium ont fourni des résultats analogues.

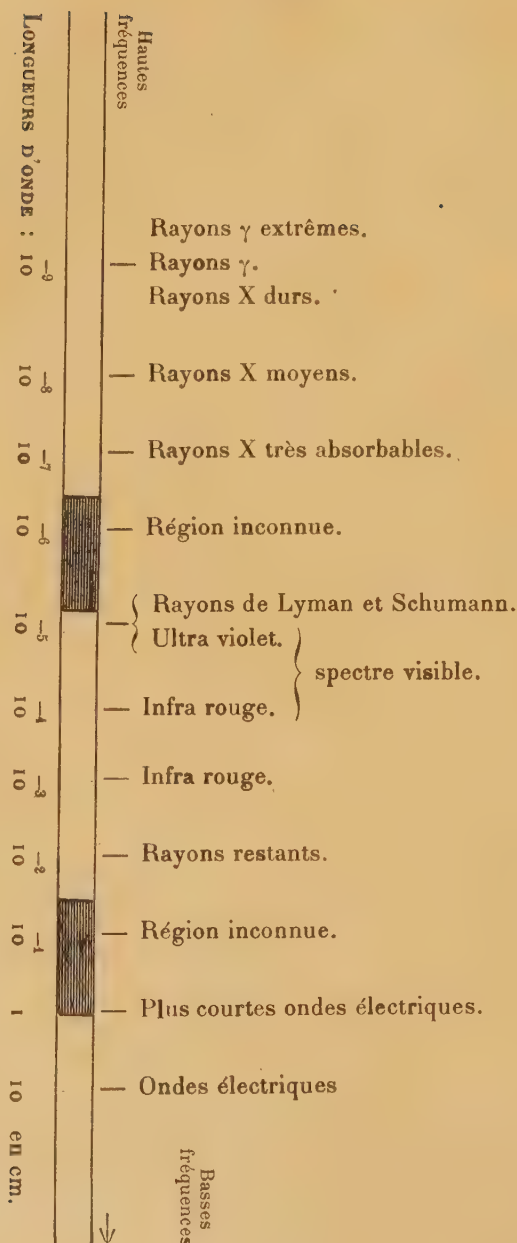
Classement et longueur d'onde. — Pour ce qui est de l'évaluation des longueurs d'onde et de leur classement dans le spectre, nous nous contenterons du tableau de la page suivante :

Propriétés des rayons X. — Les rayons X, tout comme les radiations lumineuses, sont donc des vibrations ondulatoires de l'éther, ils peuvent subir la diffraction de la polarisation ; ils se propagent en droite ligne.

Transparence des corps aux rayons X ; Absorption. — Nous avons déjà noté que ces rayons font exception à la loi qui régit la transparence des corps aux rayons lumineux. La matière, en effet, sous n'importe quelle forme qu'elle se présente, se laisse plus ou moins traverser par ces rayons. Mais si l'opacité absolue n'existe pas vis-à-vis d'eux, il en est de même de la transparence absolue.

Quand on expose un corps quelconque aux rayons de Roentgen et qu'on cherche à déterminer son degré de transparence, en examinant son image à l'écran au platino-cyanure de baryum, on remarque qu'elle tranche toujours par une certaine obscurité sur un champ parfaitement clair de l'écran frappé directement par

CLASSEMENT DES RAYONS γ ET DES RAYONS X DANS LE SPECTRE



les rayons. Le faisceau émergent ne se trouve pas être égal au faisceau incident. Ceci est dû à un phénomène d'absorption qui a lieu dans l'intimité même du corps. Une radiation s'absorbe dans la matière par disparition du champ électro-magnétique oscillant qui la constitue et les effets matériels produits sont fonction de l'énergie électro-magnétique disparue.

On peut poser en principe : Faisceau émergent = Faisceau incident — Fraction absorbée.

Le degré de cette absorption est très variable selon le corps, très prononcé avec l'un, il sera très faible avec l'autre. Elle est minime pour les corps organiques, très élevée pour les métaux lourds. Nous verrons que cette propriété est fonction du poids atomique. Mais un même corps se révèle plus ou moins opaque avec des tubes divers ou, ce qui revient au même, avec un tube fonctionnant à des degrés différents de vide ou avec des voltages variables. C'est alors une qualité spécifique de plus ou moins grande pénétration des rayons qui intervient.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les rayons cathodiques — la véritable source radiogène — engendrés dans une ampoule sont différents et se montrent capables d'effets différents selon le degré de vide de l'ampoule et le voltage employé. En vertu de la formule $\frac{1}{2} MV^2$ qui exprime l'énergie cumulée par l'électron et libérable au point d'accélération négative, l'énergie libérée — sous forme chimique, calorique et rayonnement X — est d'autant plus considérable que la vitesse V est élevée (M ne change pas); V variant avec la chute de potentiel. Pour un rayonnement cathodique de faible énergie cinétique, la propriété radiante X ne sera donc pas la même que pour un rayon-

nement d'énergie cinétique intense. Mais le rayon X engendré se montre lui-même également différent selon le cas : très peu pénétrant dans le premier (voltage peu élevé — ampoule molle), il est au contraire très pénétrant — dur — dans le cas contraire. Il est à rappeler que la nature de la cathode intervient également.

La transparence devient donc fonction de deux variables : 1° la nature du corps — 2° la qualité des rayons. Nous savons de quels facteurs dépend la qualité du rayon, nous n'y reviendrons pas.

Cette question a été particulièrement mise à l'étude par Benoist, qui a établi que l'atome de chaque corps a un pouvoir d'absorption invariable, quel qu'en soit l'état physique ou la combinaison chimique. En prenant comme étalon un corps suffisamment transparent sous une épaisseur donnée, et en pratiquant avec des rayons homogènes, il a ramené les autres corps à une épaisseur convenable pour avoir la même transparence. Les chiffres obtenus constituent les équivalents de transparence pour les rayons considérés et expriment les poids par centimètre carré de substance qui, sous une épaisseur convenable, présentent la même transparence. Se basant sur ces équivalences, Benoist a établi que l'opacité spécifique d'un corps :

1° Pour une qualité donnée de rayons X et pour une épaisseur déterminée est indépendante de l'état physique de ce corps.

2° Elle est indépendante du mode de groupement de ses atomes ou molécules.

3° Elle est indépendante de l'état de liberté ou de combinaison des atomes.

4° Elle est une fonction déterminée qui croît géné-

ralement avec le poids atomique pour les corps simples (1).

Étudiée au point de vue radiologique, la matière acquiert donc une propriété nouvelle et spécifique : la transparence ou l'opacité aux radiations de plus courtes longueurs d'ondes actuellement connues (inférieures à 10^6 mm.). Cette propriété est une constante qui suit l'atome dans ses combinaisons chimiques, si bien que le pouvoir absorbant moléculaire est la somme des pouvoirs absorbants atomiques. Ce pouvoir absorbant change quand on passe d'un rayonnement à un autre, mais là encore il se comporte en toute circonstance de la même manière. Il est à noter cependant qu'il se fait à travers la matière une sélection de rayons, les moins pénétrants se trouvent rapidement absorbés par les premières couches et au fur et à mesure que de nouvelles couches sont traversées, le faisceau émergent se montre de plus en plus homogène comme qualité et d'un pouvoir de pénétration plus grande. Après une épuration suffisante sur lames d'aluminium, filtration comme on a coutume de dire, l'absorption croît en progression géométrique lorsque l'épaisseur de la matière irradiée croît en progression arithmétique.

Certains corps laissent mieux passer les rayons X que d'autres. Ils sont dits *aradiochroïques* par opposition à ceux qui absorbent une plus grande partie du faisceau incident et appelés *radiochroïques*.

(1) En se reportant à l'ouvrage de sir J.-J. Thomson (déjà cité, p. 40), on se rend compte que le phénomène d'absorption fait partie, des *propriétés intrinsèques* de l'atome dépendant des électrons intérieurs et non de ses *propriétés constitutives* qui sont sous la dépendance des électrons extérieurs.

Propriétés lumineuses et calorifiques. — En frappant un corps, l'énergie radiante du faisceau X produit presque les mêmes effets que les rayons lumineux, surtout les rayons ultra-violet. Une partie de cette énergie sert à produire des effets de luminescence. C'est ainsi que certains corps soumis à l'action de ces rayons s'illuminent et la lumière qu'ils émettent s'éteint avec l'action excitatrice : *Fluorescence*. D'autres deviennent *phosphorescents*, c'est-à-dire brillent encore après la cessation de l'excitation. Ces phénomènes sont particulièrement visibles avec le platino-cyanure de baryum et de calcium, le tungstate de calcium, le sulfate de quinine, etc..., et sont d'autant plus intenses, de même que presque toutes les autres propriétés de ces radiations, qu'elles sont de plus courte longueur d'onde. Une autre partie de l'énergie produit par influence l'accélération de l'agitation particulaire de la matière, élève donc son degré thermique, et se retrouve ainsi sous forme de chaleur. Ce pouvoir calorifique est minime.

Actions chimiques. — La dégradation de l'énergie radiante de Roentgen donne lieu également à des effets chimiques par dissociation moléculaire, effet duquel on peut rapprocher la dissociation des molécules gazeuses en ions. Elle donne aussi probablement lieu à une manifestation des forces matérielles; la dissociation atomique, la désagrégation de la matière. Sous cette influence, certaines substances comme l'iodoforme en solution chloroformique se décomposent, d'autres subissent des changements de coloration, NaCl, KBr... Le platino-cyanure de baryum vire du jaune verdâtre au brun (effet Villard). Ces rayons impressionnent vivement la plaque photographique.

Il est à remarquer que ce sont les corps ordinairement influencés par les rayons lumineux et l'ultra-violet en particulier, qui sont également sensibles à l'action des rayons X. Il se révèle en outre un certain antagonisme entre l'action chimique des rayons lumineux et des rayons de Roentgen. La lumière fait non seulement disparaître une coloration obtenue à l'aide des rayons de Roentgen mais peut même effacer l'impression produite sur certaines émulsions photographiques par une exposition convenable.

Ionisation des gaz. — Quand le corps irradié par le rayon X est un gaz, nous savons de par les lois établies par Benoist que l'absorption ne dépend que de son atome et non de son état physique particulier. Mais un phénomène nouveau se montre ici. De même que dans les dissolutions où le solvant dissocie un certain nombre de molécules du soluble en deux sous-molécules appelées ions, l'énergie radiante X produit une dissociation de la molécule gazeuse en deux sous-molécules; chaque sous-molécule s'entoure d'un agrégat de molécules non dissociées et c'est à ces groupes moléculaires électrisés qu'on donne le nom d'ions gazeux. Par ce fait, les gaz deviennent conducteurs de l'électricité; ils déchargent les corps portant des charges statiques, et établissent un courant entre les plateaux d'un condensateur à air. Ces faits, établis dès le début sur les rayons de Roentgen, sont aussi communs aux rayons du radium.

Émission de rayons cathodiques par la matière soumise à l'irradiation X. — Nous avons étudié plus haut l'émission de rayons secondaires par les corps à poids

atomiques supérieurs à 28. Dans cette étude nous ne nous sommes occupés à vrai dire que d'une partie seulement de l'émission, car elle n'est point simple^e ni homogène. Tout ce que nous avons dit s'applique à une fraction non déviable du faisceau par l'aimant, fraction constituée par de véritables rayons X prenant naissance au point frappé par un faisceau primaire et n'en différant, à ne considérer comme cathode et anticathode qu'un même métal, que par une longueur d'onde plus grande. En faisant une étude plus approfondie, on trouve que la plupart des corps frappés par les rayons X émettent des charges négatives, des corpuscules cathodiques. Curie et Sagnac ont montré que, prise en bloc, l'émission secondaire porte une charge négative. Dorn a établi l'action du champ magnétique sur le faisceau d'émission des métaux lourds qui se trouve dévié et étalé.

Ce faisceau est formé par :

- 1° Des rayons du faisceau primaire diffusés ;
- 2° Des rayons analogues aux rayons X et γ du radium. Ces deux groupes ne sont pas déviables par l'aimant ;
- 3° Des rayons déviables par l'aimant, analogues aux rayons cathodiques et dont l'émission est liée à celle du second groupe.

En comparant les deux faisceaux primaires et secondaires, nous voyons que le premier est constitué par :

- a) Radiations K,
- b) Radiations L,
- c) Spectre continu formé par des radiations non encore définies.

Le second faisceau par :

1° Rayons X diffusés à rad. K et L identiques à celles du faisceau primaire ;

2° Radiations K,

3° Radiations L,

Toutes deux identiques aux radiations K et L du primaire pour un même métal;

4° Rayons analogues aux rayons cathodiques.

Cette émission de charges négatives est à rapprocher de celle analogue aux rayons cathodiques à laquelle donnent lieu les rayons du radium et les rayons ultra-violetés quand ils frappent la matière. Ces derniers provoquent avec certains métaux, en particulier les métaux alcalins, un rayonnement identique aux rayons cathodiques. Or, dans la plupart des cas, l'émission d'électrons correspond à une désagrégation de l'atome. Faut-il conclure que la propriété fondamentale des radiations à courtes longueur d'onde, et des rayons de Roentgen en particulier, serait de produire ou d'activer la dissociation de la matière ? — Serait-ce de là que découleraient leurs propriétés actiniques si puissantes ?

Action sur la cellule. — En se référant à la théorie atomique on est amené à admettre que le rayon X en frappant une cellule vivante doit donner lieu à un rayonnement secondaire et produire des modifications dans l'agencement des électrons des atomes, et par suite donner lieu à des réactions chimiques.

Le faible poids atomique des corps organiques les fait entrer dans la série où ce rayonnement, par suite de son faible pouvoir pénétrant, n'a pu encore être mis en lumière. Quoi qu'il en soit, l'expérience montre que cette action varie d'intensité selon les différents tissus

de l'organisme mais qu'elle est d'autant plus forte que la cellule est plus jeune et que son devenir karyokinétique est plus long.

* * *

Il est à se demander si les rayons X de qualités différentes, c'est-à-dire de pouvoir de pénétration varié, produisent des effets différents? Il est *logique* d'admettre que l'action de ces rayons doit être en quelque sorte spécifique de leur énergie propre, et par suite, fonction de la fréquence et de la longueur d'onde d'un faisceau monochromatique considéré. M. Guillemillot, dans un travail (1) antérieur aux études spectrophotiques des rayons de Roentgen, dit qu'il n'y a pas spécificité d'action des rayons X de qualités variées. D'après lui, les rayons ne possèdent pas une spécificité selon leur degré de pénétration, leur longueur d'onde, et à doses absorbées égales, les effets sont les mêmes. Il constate d'ailleurs qu'on se trouve là en présence d'un fait remarquable.

Aucune preuve scientifique ne peut encore être donnée de la spécificité d'action des rayons X selon la longueur d'onde et la fréquence, mais on est porté à croire que la difficulté de mettre en lumière des réactions biochimiques de cette délicatesse tient d'une part et surtout à l'impossibilité où nous sommes de réaliser des faisceaux homogènes, réellement monochromatiques, et, d'autre part, peut-être, au défaut de réactifs ou procédés suffisamment sensibles et minutieux.

Spectographie. — Ce n'est pas dans le domaine mé-

(1) H. Guillemillot. *Les nouveaux horizons de la science*. t. 2, p. 239.

dical seul que les rayons X jouent un grand rôle. De nos jours, grâce aux nouvelles ampoules, la radiographie permet de déceler les moindres défauts des pièces métalliques d'une certaine et notable épaisseur ; et cette radiométallographie prend actuellement une extension de plus en plus considérable. Ils constituent d'autre part un excellent moyen d'analyse chimique comme s'il suffisait, dit M. de Broglie, de regarder au spectroscope la couleur d'un corps pour savoir exactement de quoi il est fait.

Il découle précisément de ce que nous connaissons des propriétés de ces radiations qu'il suffit d'exposer le corps à étudier à l'action des rayons de Roentgen et d'analyser le spectre du rayonnement secondaire pour en connaître la constitution. Ce procédé a permis d'étendre les résultats de l'analyse spectrographique à presque tous les éléments et de vérifier la façon parfaitement régulière dont le spectre se déplace quand le poids atomique croît. Il est à noter cependant que les corps simples à poids atomiques inférieurs à 28 (Al) ont résisté jusqu'à présent à ces recherches, probablement parce que la radiation qu'ils émettent est trop absorbable.

Les rayons γ des corps radio-actifs, de même nature que les rayons de Roentgen, se prêtent à la même analyse. On y trouve, à côté de rayons X caractéristiques de corps à poids atomiques élevés, des rayons à longueur d'onde extrêmement courte, beaucoup plus courte que celle des radiations les plus pénétrantes fournies par les ampoules.

La spectroscopie des rayons de Roentgen pourrait bien être pour la radioactivité ce que la spectroscopie des rayons lumineux a été pour la chimie.

III

L'ampoule de Crookes, qui avait servi aux premières recherches sur les rayons de Roentgen et à leurs applications médicales, avait une forme de poire allongée et était munie de deux électrodes métalliques, la cathode se trouvant à une extrémité et l'anode fixée latéralement par rapport au grand axe. Les rayons X prenaient naissance sur la paroi élargie opposée à la cathode.

Ce premier type présentait de graves défauts. L'échauffement du verre obligeait à de fréquentes interruptions du courant pour assurer son refroidissement, d'où, longueur de temps excessive pour une pose. D'autre part, la large surface d'émission des rayons X ne permettait point d'obtenir des contours précis. Les pénombres altéraient leur netteté. Le fonctionnement de l'appareil enfin était marqué d'une insconstance très gênante, causée par les variations de la tension du gaz intérieur.

Sylvanus Thomson, s'inspirant de la constatation de Roentgen que les rayons X prennent naissance sur la paroi du verre, c'est-à-dire l'obstacle rencontré, apporta en 1896 le premier perfectionnement en remplaçant le disque plan de la cathode par une pièce métallique à surface concave, au devant de laquelle il plaça une lame de platine, désignée sous le nom de focus et disposée

à 45° environ sur l'axe du tube. Ce focus, anticathode ou encore anode, puisqu'il pouvait être relié au pôle positif de la source électrogène, se trouvait au centre de l'ampoule de forme sphérique, et non plus ovoïde. La cathode, en aluminium, fut placée dans un prolongement cylindrique de l'ampoule de diamètre à peine supérieur au sien. Grâce à ces modifications, le foyer d'émission des rayons X devenait presque ponctiforme. Quant à l'anticathode, pour éviter sa fusion et aussi pour obtenir des rayons d'une plus grande pénétration, on choisit pour sa confection un métal non seulement à point de fusion élevé, mais encore de poids atomique considérable : le platine (195), auquel on allia même l'iridium pour augmenter davantage sa résistance à l'élévation de la température.

Pour obvier à l'irrégularité du fonctionnement, on eut recours aux procédés ci-dessus mentionnés, à savoir : d'une part l'usage de substances capables de mettre du gaz en liberté par le chauffage et contenues dans une cavité accessoire de l'ampoule ; d'autre part, l'emploi de l'osmo-régulateur.

Au premier groupe appartiennent les ampoules à régulateur à la potasse et celles à régulateur par étincelle traversant une substance capable de mettre en liberté du gaz renfermé mécaniquement.

La vie d'une ampoule munie de tels régulateurs dépend forcément de la quantité de gaz que ces substances peuvent mettre en liberté, quantité toujours faible. Aussi a-t-on de plus en plus délaissé ces modes de réglage en faveur du régulateur à air qui fait pénétrer directement, à l'aide d'une pompe, de l'air dans le tube, et surtout en faveur de l'osmo-régulateur qui rend de plus grands services et possède l'avantage que les au-

tres n'offrent pas, de pouvoir aussi bien servir au ramollissement de l'ampoule, en y faisant pénétrer de l'H, que pour son durcissement en en soustrayant.

* * *

Les ampoules munies de ces perfectionnements possédaient déjà des qualités très grandes et constituaient entre les mains du praticien un merveilleux instrument d'investigation et de traitement. Mais, le temps nécessaire pour une radiographie ou une séance de radiothérapie était encore considérable. Tandis qu'au début de la radiologie, on ne disposait que de sources électrogènes de médiocre puissance, les progrès réalisés avaient renversé l'ordre des choses et c'était alors l'ampoule capable de supporter un grand débit qui faisait défaut. De nouvelles modifications devenaient nécessaires.

Les difficultés à vaincre n'avaient pas varié, l'élévation de la température de l'anticathode et sa fusion constituaient le principal obstacle à un débit quelque peu considérable. C'était donc la structure de cette partie de l'ampoule qu'il fallait modifier. Trois moyens s'offraient :

A. Diminuer le degré de fusibilité de l'anticathode, en faisant choix d'un métal autre que le platine (Point de fusion 1.750°).

B. Supprimer les inconvénients de la chaleur en excès, soit en lui assurant une diffusion rapide, soit en la répartissant dans une masse considérable d'anticathode. — Tous ces moyens pouvaient, bien entendu, se combiner.

Dans le premier groupe (ampoules Chabaud, Thurneyssen) l'anticathode est rendue beaucoup plus réfractaire par la substitution partielle de l'iridium ou platine.

Dans le second groupe, on trouve l'ampoule à refroidissement par eau, type Thurneyssen, par exemple. L'anticathode forme le fond d'un tube rempli d'eau qui par évaporation assure la diffusion de la chaleur. On peut par une canalisation bien isolée, la faire circuler.

L'eau peut être remplacée par l'air qui ne laisse pas à craindre des phénomènes de caléfaction qui, pour une élévation de température quelque peu considérable, risquent de mettre l'ampoule hors d'usage par perforation de l'anticathode. Ces ampoules peuvent fonctionner avec un courant de 10 milliampères pendant un temps suffisant pour les séances ordinaires (Modèle Pilon). Mais le procédé du refroidissement a par lui-même des inconvénients et oblige à des complications d'installation qui deviennent encombrantes, sinon parfois impossibles à réaliser.

Avec l'anticathode massive, il est aisé de réunir tous les moyens ci-dessus mentionnés pour dissiper l'excès de chaleur. Dans le modèle Pilon, entre autres, le platine est remplacé par le tungstène (Point de fusion 3.200°). Ce métal constitue l'anticathode sous forme d'une lame de 2 mm. environ d'épaisseur, enchassée dans la masse d'un autre métal bon conducteur : cuivre, nickel. Ce dispositif permet déjà un refroidissement qu'on peut appeler passif par dispersion de la chaleur du tungstène à la masse beaucoup plus considérable dans laquelle il est inclus. Le refroidissement actif est réalisé par la mise en contact d'une large surface de l'anticathode, creusée intérieurement en tube,

avec l'eau ou l'air. Une telle ampoule supporte 15 à 30 milliampères pendant quelques secondes.

Un résultat très satisfaisant s'obtient à l'aide d'ailettes de refroidissement dont on munit l'anticathode. Le principe en est simplement l'augmentation de la surface de rayonnement calorique. A l'anticathode fait suite une tige de métal bon conducteur à laquelle sont ajustées de larges lames métalliques. La chaleur se transmet le long de la tige, du point d'impact à ces lames qui la rayonnent à l'atmosphère ambiante. Ce procédé de refroidissement a l'avantage d'être aussi commode que simple.

Dans le but de faciliter la radioscopie stéréoscopique, on a souvent ajouté une troisième électrode aux ampoules, électrode connectée avec le pôle positif de la source électrogène et jouant le rôle d'une seconde anode. Ces tubes sont dits bi-anodiques.

Fonctionnement de l'ampoule. — L'ampoule neuve en marche présente une vive luminosité dans toute l'hémisphère opposée au plan de l'anticathode. Si des oscillations se produisent, cette luminosité cesse d'être fixe et continue. Nous savons qu'elle est due à la diffusion par l'anticathode des rayons cathodiques qui, en atteignant les parois, donnent naissance à des rayons X secondaires : rayons pariétaux — en même temps qu'ils les rendent luminescentes. Cette hémisphère prend peu à peu une coloration sombre violacée. Des phénomènes de réduction, surtout des sels de manganèse contenus dans le verre, en sont la cause. La luminescence fait alors défaut. La pulvérisation de la cathode, d'autre part, très intense avec le platine, relativement minime

avec l'aluminium, produit ce qu'on appelle la *métallisation* de l'ampoule. En pratique, la métallisation ne doit se faire que très lentement et tardivement, car on se sert de l'aluminium pour la confection de la cathode. Mais il est nécessaire de bien veiller à supprimer toute oscillation et surtout, d'éviter une erreur de connexion qui, faisant du focus de platine une cathode, ne tarderait pas, dans l'espace de quelques secondes, à produire cette métallisation. Le verre métallisé offre un aspect fumé.

* * *

Que pouvons-nous conclure de cette étude pour l'utilisation pratique des ampoules ? Il est avéré qu'elles ont rendu et rendent encore d'inappréciables services. N'est-ce pas avec ces mêmes appareils que la radiologie a atteint son degré actuel de perfection ? Il n'en est pas moins vrai qu'elles ont encore des défauts.

Le temps est précieux et les radiothérapeutes trouvent bien long de passer 15 et 20 minutes pour une séance. Les radiographes voudraient pouvoir réduire davantage la pose, pas tant par économie personnelle de quelques secondes, qu'afin de pouvoir assurer une meilleure et plus parfaite immobilité du patient. D'autre part, cette surveillance, obligatoire, incessante et continue de l'ampoule est fort gênante. Sans parler de la radioscopie où l'on désirerait un instrument aussi docile que maniable où l'on pourrait aisément modifier dans des limites assez étendues les caractères physiques du débit radiant, il est un cas au contraire où l'on serait heureux d'avoir un appareil qui ne varie pas, qui reste identique à lui-même, et fournisse

un rayonnement avec des qualités désirées et fixées à l'avance : la radiothérapie.

Quand on a réglé une de ces ampoules selon la longueur de l'étincelle, bien peu de temps après on est obligé d'intervenir pour la ramollir. Le rayonnement n'est pas constant et jamais en vérité l'ampoule n'est identique à elle-même d'un moment à l'autre.

Ces écueils sont évités, comme nous le verrons, par l'emploi des tubes dits à *vide parfait*.

IV

Hittorf avait montré (1869) qu'en portant à l'incandescence la cathode d'un tube radiogène, la résistance à la décharge diminuait dans la proportion de 100 p. 1. Ce fait, resté assez longtemps inexpliqué, devait plus tard amener une révolution dans l'outillage radiologique.

Une dizaine d'années environ avant la découverte de Roentgen, Edison, le célèbre inventeur américain de la lampe électrique à incandescence, reconnut que le filament de charbon de cette lampe électrique chauffé au rouge dans le vide, émet une décharge électrique négative (Effet Edison).

Il établit en effet (1) (1883) que dans une ampoule vide d'air on peut faire passer un courant entre un filament de lampe à incandescence au rouge blanc et une plaque métallique portée à un potentiel plus élevé que ce filament.

Si on réunit la plaque P (fig. 2) au pôle positif d'une pile dont le pôle négatif est uni à l'extrémité négative du filament *f*, chauffé par la batterie d'accumulateurs A, et si on intercale un milliampèremètre MAM dans le circuit, alimenté par la pile B, qui comprend la plaque, le filament et l'espace vide d'air séparant la plaque du filament, on verra l'aiguille dévier et marquer le passage d'un courant.

(1) Cf. G. Gutton : *La lampe-valve à trois électrodes*. R. G. E 26 avril 1919, p. 629.

Un autre physicien, Richardson, poursuivit dans cette voie, sur le charbon et sur divers métaux, une série de recherches dont la conclusion générale, formulée en 1903, fut la suivante : *Les métaux chauffés dans le vide jusqu'à l'incandescence émettent des électrons analogues aux électrons des rayons cathodiques*

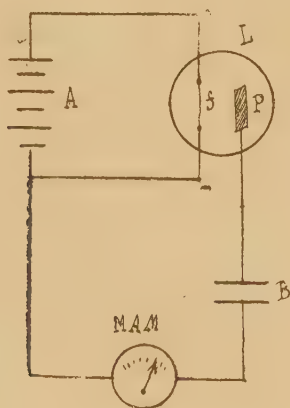


Fig. 2.

dont le nombre croît avec la température du métal incandescent et dépend exclusivement de cette température.

Tel fut le point de départ des tentatives de toute une série de chercheurs pour construire des ampoules à rayons X avec cathode incandescente, source d'électrons ; et l'on peut dire que le dispositif ci-dessus schématisé a été la première réalisation de l'ampoule à « cathode chauffante ».

Ces tentatives aboutirent à l'invention de l'ampoule Lilienfeld en Allemagne et de l'ampoule Coolidge aux Etats-Unis.

★ ★

Deux gros obstacles se dressent devant les constructeurs dans la confection de ces tubes, l'un, tenant à la difficulté de réaliser un vide pratiquement parfait, par expurgation des gaz occlus, l'autre, résidant dans l'embarras où l'on se trouve de concentrer les électrons d'une façon efficace pour former un faisceau cathodique aussi serré que possible.

Lilienfeld et Coolidge ont chacun résolu d'une manière différente ce dernier problème et c'est là qu'il faut voir la raison de la dissemblance de leurs ampoules.

★ ★

C'est A. Wehnelt (1) qui, le premier, essaya, en 1905, en Allemagne, un tube radiogène à vide, basé sur l'effet Edison. Le faible pouvoir pénétrant des rayons X produits ne permit pas l'entrée en pratique de cette ampoule.

En 1911-12, Lilienfeld construisit le tube qui porte son nom et qui, d'après les auteurs allemands (2), donne de bons résultats.

TUBE LILIENFELD

Disposée dans un renflement inférieur de l'ampoule (fig. 3), la cathode chauffante C. ch. se présente à peu près sous la forme d'un filament de lampe à incandescence. Elle est maintenue à une température élevée

(1) *Fortschritte auf dem Gebite der Roentgenstrahlen; die Gas freien Röhren in der Roentgenlogischen Praxis*, von Prof. A. Schönberg. Band, 24^e, Heft 5, 22 mars 1917.

(2) Ledoux-Lebard, *Journ. de Rad.*, n° 8, tome IV mars-avril 1917.

et modifiable à volonté par un petit transformateur de chauffage T. ch. (fig. 4) et émet des électrons en abondance et dans toutes les directions. Cette partie

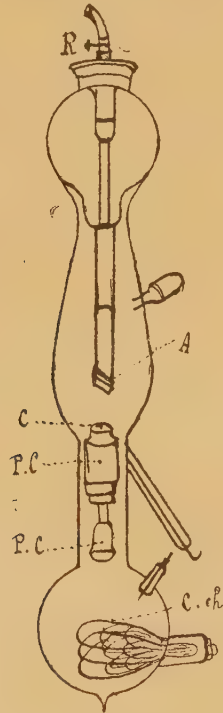


Fig. 3.

ampullaire du tube constitue ainsi un réservoir à électrons.

Pour puiser dans ce réservoir et diriger les électrons vers l'anticathode A, une pièce de concentration P. C. est disposée dans le tube, entre l'anticathode et la cathode chauffante. Cette pièce métallique est perforée sur toute sa longueur, pour laisser libre passage aux électrons, et s'ouvre en entonnoir vers la cathode chauffante. En envoyant, au moyen d'un second transforma-

teur accessoire de mise en marche TM, un courant de moyen voltage (3000 volts environ) de cette pièce de concentration vers la cathode chauffante, la pièce de concentration, chargée positivement, va attirer les électrons qui s'engageront dans son entonnoir.

Mais la différence de potentiel existant entre PC et Cch est peu élevée (3000 volts) par rapport à celle qui

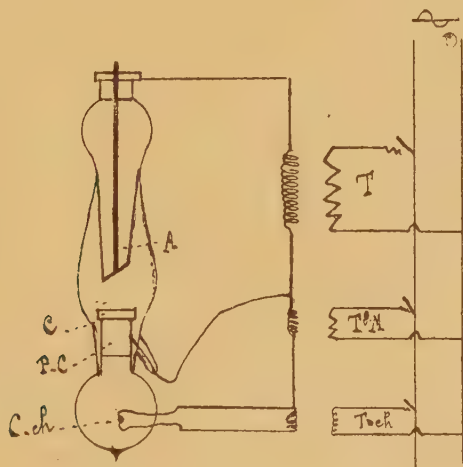


Fig. 4.

existera entre l'anticathode A et la cathode chauffante, et que fournit un troisième transformateur T (ou une bobine), comme celui des installations courantes. Les électrons ne vont donc pas se neutraliser sur les parois de la pièce de concentration, mais seront attirés jusqu'à l'anticathode suivant des trajectoires qui dépendent des forces qui leur sont appliquées (c'est-à-dire des intensités de champ) et viendront y produire des rayons X.

D'après Lilienfeld, ce tube, une fois amorcé, fonctionnerait aussi comme un tube ordinaire, la pièce de

concentration jouant le rôle de cathode et émettant des électrons qui s'ajoutent à ceux qui proviennent de la cathode chauffante. Cette manière de voir semble assez étonnante. Comment la concilier avec l'absence d'afflux cathodique, puisque le vide est parfait ?

Dans la pratique, on peut supprimer le transforma-

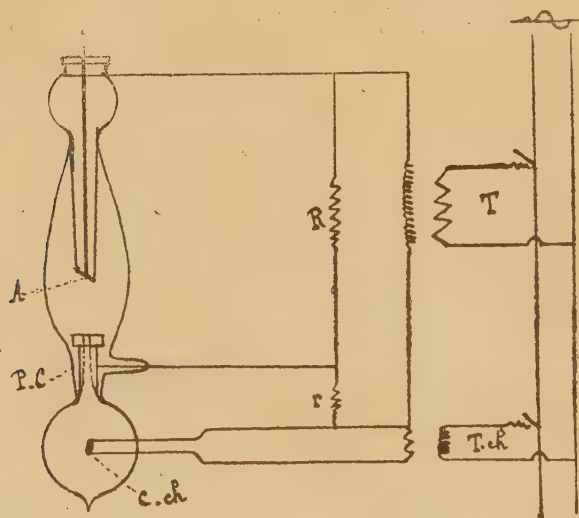


Fig. 5

teur accessoire d'allumage, en intercalant une résistance spéciale R (fig. 5) sur le circuit à haute tension. Un double réglage devient possible en faisant varier la température du filament, d'une part, et le voltage aux bornes du tube de l'autre. Le refroidissement est à eau.

En résumé, une partie des électrons accumulés dans le réservoir où ils sont émis, est dirigée, à l'aide d'une première différence de tension et amenée jusqu'à la pièce de concentration, puis, à l'aide d'une seconde différence de tension, de là jusqu'à l'anticathode.

TUBE COOLIDGE

Dans la *Physical Review* (1) de décembre 1913, W.-D. Coolidge, ingénieurs aux laboratoires de la General Electric C^o de Schenectady (Amérique), donna pour la première fois la description d'un tube à rayons X, conçu d'après l'effet Edison et devenu réalisable grâce aux travaux de Furstenuau et de de Langmuir et par suite du développement de l'industrie tungstène.

L'ampoule Coolidge présente une configuration extérieure très analogue à celle des ampoules à gaz raréfié. Mais elle en diffère d'une part, et cela n'est pas apparent, en ce que son atmosphère intérieure a été raréfiée jusqu'aux limites du possible. C'est, pratiquement au moins, une ampoule à vide parfait. D'autre part, elle en diffère visiblement, par sa cathode qui en est la partie vraiment originale.

Une sphère de verre, de diamètre variable de 90 à 180 mm., forme le corps de l'ampoule ; à deux pôles opposés de la sphère sont soudés deux manchons de verre comportant, l'un, la cathode, et l'autre, l'anode, manchons dont la longueur est calculée de façon à éviter un éclatement d'étincelle entre les fils électro-conducteurs. La longueur d'ensemble du tube varie de 45 à 55 cm.

Le manchon engainant l'anode, qui est aussi anticathode, comporte un dispositif semblable à celui des ampoules à air raréfié pour l'accrochage du fil à haut potentiel : un anneau, faisant suite à la masse anticathodique ; celui engainant la cathode se termine par

(1) *Physical Review*, U. S, vol. II, n^o 6, déc. 1913.

une douille Edison, supportant également un anneau pour accrocher le second fil à haute tension. Cette douille à pas de vis, pareille à celle adaptée aux lampes à incandescence, et fonctionnant de même, sert à assurer la circulation du courant de chauffage de la cathode.

L'appareil ne possède que deux électrodes, l'anticathode faisant fonction d'anode.

Cathode. — La cathode est constituée d'un mince filament plat de tungstène, enroulé en spirale, dont les deux bouts sont soudés chacun à une tige conductrice de molybdène, noyée dans un manchon de verre, servant de support. Le filament spiralé se trouve en connexion et placé à 1 mm. en avant d'une pièce métallique (molybdène) de forme plus ou moins concave selon le modèle du tube, et cet ensemble est confectionné de façon à donner un faisceau convergent de rayons cathodiques ; au point de convergence de ces rayons se trouve le point d'impact anticathodique.

Anticathode. — L'anticathode est, suivant le type de l'ampoule, formée d'une pièce massive de tungstène ou d'une lame de même métal, enchâssée dans une masse de cuivre rouge, fondue et taillée à 45° ; de manière à constituer le miroir anticathodique. Le choix du tungstène est dû à son point de fusion élevé (3200'), son grand poids atomique (183.6) et à sa faible tension de vapeur. A cette masse fait suite une longue tige de molybdène, maintenue par un dispositif de soutien, tige dont la longueur protège efficacement le système de soutien contre la transmission de la chaleur. Dans certains modèles ce système est évidé pour assurer un meilleur refroidissement. Dans le type en

usage dans l'armée américaine (Modèle Radiateur) le refroidissement est assuré par des ailettes.

Vide. — Le vide, de l'ordre de quelques centièmes de micron (1), réalisé dans ces tubes, est aussi parfait que le permettent les appareils modernes (pompe moléculaire de Gaede) ; une différence de potentiel de 100.000 volts et plus ne peut en avoir raison. L'obstacle à surmonter dans la fabrication de ces tubes provient de la difficulté que l'on rencontre à expurger de façon suffisamment complète les parois de verre et surtout les pièces métalliques des gaz occlus. A cet effet, chaque pièce et le ballon sont portés, en vase clos, aux plus hautes températures compatibles au moment où l'on procède au vide.

Vu la raréfaction extrême des gaz, aucun phénomène d'ionisation n'est observable dans l'intérieur de ces tubes, ce qui implique l'absence de choc de molécules gazeuses entre elles.

Montage. — L'anticathode se relie directement au pôle positif de la source à haut potentiel ; la cathode se met en connexion, d'une part, avec le pôle négatif de la même source, et d'autre part, avec les pôles de l'appareil fournissant le courant électrique de basse tension. (V. fig. 7 et suivantes.)

Il faut noter que tout ce qui est en connexion avec l'ampoule se trouve naturellement porté au même potentiel qu'elle. Il est donc de rigueur d'assurer l'isolement parfait de tous les appareils, y compris le dispositif donnant le courant de basse tension.

(1) A la pression normale il y a $3 \cdot 10^{19}$ molécules par cm^3 ; à ce degré de vide il en reste encore $3 \cdot 10^{16}$.

Mise en marche. — Tant que la cathode n'est pas portée à l'incandescence aucun voltage ne parvient à provoquer une décharge. Cette incandescence s'obtient à l'aide d'un second courant d'environ 3 ampères et d'une tension de quelques volts, fourni soit par une batterie d'accumulateurs (modèle Pilon), qu'on a de plus en plus tendance à délaissier, soit par un petit transformateur (modèle Gaiffe ou autre).

Pour faire fonctionner le tube, il faut donc commencer par porter le filament cathode à l'incandescence, et c'est alors seulement qu'on peut, sans danger pour l'ampoule, fermer le circuit de haute tension dont elle fait partie.

Il se produit parfois au moment de la mise en marche du tube un phénomène que la pratique apprend à connaître. En procédant au réglage, on s'aperçoit, dans certains cas, qu'après avoir porté la cathode à l'incandescence, au moment où on lance le courant de haute tension, le voltage aux bornes subit une légère baisse ; il faut pour le ramener à la valeur voulue agir sur les rhéostats du transformateur à haute tension.

Ceci n'a lieu que si le courant traverse un rhéostat au primaire — car celui-ci absorbe de l'énergie. — Il ne s'observe pas avec un auto transformateur, et pour utiliser pleinement toutes les qualités du tube Coolidge, il faut précisément pouvoir faire varier d'une façon indépendante l'intensité et la tension. C'est donc là une variation qui tient non pas au tube mais à la déperdition de l'énergie dans un rhéostat.

Théorie du fonctionnement. — Deux facteurs interviennent dans le fonctionnement de cette ampoule ;

d'une part, la différence de potentiel aux électrodes, de l'autre, l'intensité du courant de basse tension.

Les variations de la différence de potentiel aux bornes font varier dans le même sens la vitesse des électrons formant le faisceau cathodique. Nous savons, en effet, que cette vitesse est fonction de la chute cathodique. *Plus le voltage sera haut, plus le rayonnement X sera conséquemment pénétrant.*

L'expérience montre cependant que ces variations ne suivent pas une courbe régulière et parallèle pour l'un et l'autre des deux facteurs : *à une même élévation du voltage ne correspond pas dans l'échelle des degrés de pénétration, la même augmentation du pouvoir pénétrant.*

Le tableau suivant (1) donne une idée de ces différences qui, d'ailleurs, peuvent varier d'un tube à l'autre :

3° Benoist	=	32.000 volts aux bornes ;
4° Benoist	=	37.000. — —
5° Benoist	=	43.000. — —
6° Benoist	=	54.000. — —
— 7° Benoist	=	76.000. — —

On voit que pour passer de 3°B à 4°B il faut 5.000 v. et 22.000 pour monter de 6°B à 7°B. On peut en déduire que plus le degré de pénétration est élevé, ou, ce qui revient au même, plus le voltage est déjà haut, plus il faut dépenser d'énergie pour gagner en pénétration.

Les variations de la température du filament métallique interviennent directement dans la libération, plus exactement sur le nombre d'électrons libérés de la ca-

(1) H. Pilon, *Le tube Coolidge*, Masson, 1919.

thode. Il en découle que *l'intensité du rayonnement X est fonction de la température du filament cathode*, varie elle-même avec l'intensité du courant de basse tension qui le traverse.

On peut se demander comment se comporte le courant secondaire traversant l'ampoule, quand l'intensité du courant de basse tension varie. On a pu écrire à ce sujet (1) :

Variations de l'intensité du courant de chauffage = variations de l'intensité du secondaire.

Ces déductions n'ont point été confirmées par l'expérience, et les travaux récents (2) démontrent, comme nous aurons à l'établir plus loin, que les variations du courant secondaire ne subissent pas, d'une façon régulière, l'influence de celles du courant de basse tension, et, qu'à partir d'un maximum assez rapidement atteint, le premier demeure constant quel que soit l'intensité du dernier.

Aspect du tube. — Tout rayonnement cathodique secondaire, se dirigeant vers les parois, faisant défaut dans ce tube, comme nous en verrons la raison, on n'y trouve ni fluorescence sur le verre, ni rayons X diffusés émanant de la paroi (1). L'ampoule n'est que modérément chaude, et ce par suite du rayonnement calorique d'une cathode incandescente et d'une anode à

(1) Cf. G. Réchou. *Le tube Coolidge*, *Paris Médical*, 2 juin 1917.

(2) M. Boll et L. Mallet. *A propos du tube Coolidge*, *Paris Médical*, n° 43, 1917.

(1) Il est bien entendu, question de rayons X secondaires provenant de rayons cathodiques diffusés de l'anticathode vers des parois et non de rayons X secondaires prenant naissance au choc du faisceau X primaire sur le verre. Ceux-ci ne peuvent être supprimés.

température très élevée. On ne constate ni phénomène d'ionisation et par suite ni fluorescence dans l'intérieur du tube, comme avec les ampoules à gaz raréfié. Le manchon cathodique qui entoure la spirale s'échauffe aussi relativement peu.

Le peu d'échauffement de la paroi du verre et de la cathode permet au tube de supporter des intensités élevées pendant très longtemps : 10 milliampères pendant plus d'une heure.

Rien en somme, sauf l'éclat brillant de l'anticathode, ne permet de différencier à vue l'état de fonctionnement de l'appareil de son état de repos.

Les transformations subies par le tube, celles qui sont sous la dépendance directe des rayons cathodiques sont exactement les mêmes que dans les ampoules à gaz raréfié. Les phénomènes d'emboutissage et de métallisation (bien moindre) sont identiques à ceux que l'on découvre dans les ampoules de Crookes. La réduction des sels entrant dans la composition du verre se produit encore sous l'influence du rayonnement X, mais elle est bien moindre que dans l'ampoule à gaz raréfié où l'action des rayons cathodiques diffusés vers la paroi s'ajoute à celle des rayons X.

Il est superflu de se demander si cette ampoule durcit (1) ou ramollit. L'osmo-régulateur ou tout accessoire

(1) Il se passe cependant dans ces tubes quelque chose de comparable au durcissement des ampoules à gaz raréfié. Langmuir a montré que la présence de la moindre trace d'oxygène réduit notablement l'émission électronique d'une surface de tungstène incandescente : si au moment du pompage, la masse anticathodique (1),

(1) Cet oxygène ne provient pas d'un vidage insuffisant de l'ampoule. Pendant le pompage le tungstène doit être maintenu à une température inférieure à celle de fusion du cuivre qui lui fait suite : c'est pour cela qu'un peu d'oxygène peut échapper à l'extraction. Il disparaît en grande partie à la longue par formation de CuO^2 et d'oxydes de tungstène.

ayant le même but ne trouvent plus leur usage, car le réglage dépend ici d'un tout autre mécanisme.

Etude électrique du tube. — Aussitôt la décharge établie, il se fait une distribution de potentiel dans le tube où, à l'encontre des ampoules ordinaires, les parois prennent partout une charge négative. D'après ce que nous connaissons de l'effet Edison, la cathode a le signe positif tant qu'elle n'est traversée que par le courant de chauffage.

La décharge ne donne lieu à aucun afflux cathodique, ni espace obscur de Hittorf, ni lumières négative ou positive, phénomènes dont l'existence est due aux ions positifs ici absents.

L'anticathode présente un point d'impact porté au rouge blanc et d'une étendue plus ou moins large selon le modèle du tube. Dans les modèles actuels (Pilon) on trouve trois dimensions : foyer fin et foyer moyen pour l'usage radiographique et scopique, foyer large, destiné à la radiothérapie. Ces variations sont obtenues par

ou l'ampoule n'ont pas été suffisamment expurgées d'oxygène occlus ou inclus, au moment du fonctionnement du tube, sous l'influence de la température élevée de l'anticathode, le filament cathodique forme en s'oxydant avec l'oxygène dégagé, une couche d'oxydes de tungstène qui nécessite une température plus élevée à même intensité, que pour une cathode fonctionnant sous une plus basse pression (1).

À la suite de ce dégagement d'oxygène, on peut, en coupant le courant électronique et pendant que le filament est encore à une haute température, voir le tube fonctionner avec le secondaire seul, comme une ampoule de Crookes d'une extrême diacité. Mais, à la longue et avec l'usage tous ces phénomènes disparaissent et il n'en reste plus qu'une résistance légèrement supérieure, à une température donnée, au passage d'un même courant.

(1) A. Dauvillier : R. O. E., 28 sept. 1918.

une légère modification de la position et des dimensions de la pièce de centrage par rapport au filament et à l'anticathode.

Tant que la température de cette dernière n'est pas très élevée, le courant ne passe que dans un seul sens, *le tube fonctionne de lui-même comme un sélecteur d'onde* et arrête l'onde inverse ; l'interposition d'une soupape devient inutile. Si sous l'action d'un bombardement électronique intense, on laisse cette température s'élever impunément, l'onde inverse s'établit, le courant passe dans les deux sens ; d'où nécessité d'un refroidissement aussi énergique que rapide de l'anticathode.

La question de la décharge dans les tubes Coolidge a été l'objet d'études très intéressantes (1) que l'on peut ainsi résumer : Alimenté sous une tension constante, ce tube donne lieu à une émission de rayons X *continue et constante* ; soumis à une tension variable, il présente un phénomène d'hystérésis marqué, dû à la fois à la présence de charges négatives dans l'espace avoisinant les électrodes, concentrées progressivement par l'onde de tension, et à la forme de celle-ci.

On peut se demander dans quelles conditions les rayons cathodiques se diffusent au niveau de l'anticathode, car, nous le savons, tout rayon cathodique rencontrant un obstacle subit une diffusion, rebondit. Dans les tubes à air, attirés par les parois, portant une charge positive, les rayons diffusés donnent naissance, à leur niveau, à des rayons X parasites, en outre des phénomènes de luminescence, de réduction et d'élévation de température. Comment peuvent-ils se compor-

(1) A. Dauvillier. *Revue gén. de l'Elect.* 24 mars 1917, p. 443.

ter dans une ampoule où, sauf l'anode, tout leur oppose une vive répulsion ?

La diffusion existe comme dans les ampoules de Crookes ; mais les électrons, au lieu de se diriger vers les parois, convergent de nouveau vers l'anticathode et la frappent un peu plus loin du premier point de choc. En dehors du rayonnement X principal provenant du point d'impact, d'autres rayons sont ainsi émis par la masse de l'anticathode, en arrière du miroir de tungstène.

Des tentatives ont été faites pour diminuer sinon supprimer ce rayonnement parasite. Coolidge a essayé entre autres un tube à anticathode engainée, comme dans les ampoules ordinaires, mais somme toute, cet inconvénient est de bien peu d'importance et pratiquement négligeable si le type d'ampoule choisi répond bien à l'emploi auquel on le destine. Ainsi dans le « Standard », le rayonnement parasite constitue presque le tiers du rayonnement total. Ce modèle ne serait donc pas aussi bon pour la radiographie ou scopie qu'un « Radiateur » spécialement créé pour cet usage ou mieux encore le « Baby Coolidge ».

Pour assurer sous une forme nouvelle les besoins de la radiologie des temps de guerre, Coolidge a réalisé un modèle de tube nouveau auquel ses petites dimensions (ballon de 8 cm. de diamètre) ont fait donner par les Américains le nom pittoresque de Baby Coolidge.

Ce tube destiné à marcher en combinaison avec un appareillage simplifié (que nous décrirons plus loin, page 77) dans lequel il reçoit directement le courant alternatif à haute tension a pour principale caractéristique de présenter un système de refroidissement de l'anticathode par radiateur à ailettes.

De la sorte dans les limites de puissance de l'ampoule, celle-ci fait toujours soupape parfaite, puisque l'anticathode ne rougit jamais.

La cathode est du type général des cathodes Coolidge à filament de tungstène, mais la pièce de concentration en forme de cupule est différente et le centrage du faisceau cathodique réglé pour donner un point d'impact extrêmement fin, c'est-à-dire des images particulièrement nettes, le tube ne devant servir qu'au radio-diagnostic.

Au lieu d'être constituée par un bloc de tungstène massif, l'anticathode est formée par une pastille de tungstène enclavée dans une barre de cuivre coulé, ce métal assurant particulièrement bien la conduction de la chaleur qui se trouve éliminée ainsi par deux mécanismes, le premier de conduction jusqu'au niveau du radiateur, et le second, de convection au niveau de ce dernier.

Ce tube est fait d'après les indications des constructeurs pour fonctionner à un régime continu de 3 à 5 MA, avec 10 cm d'étincelle environ et un régime de 10 M.A. pendant un temps qui ne doit pas dépasser une minute.

Pratiquement d'ailleurs on peut sans inconvénient dépasser très largement les limites indiquées et comme il suffit d'un point d'impact ayant une surface très légèrement plus étendue pour augmenter considérablement la puissance du tube, son inventeur a pu annoncer récemment la mise en service de tubes Coolidge à radiateur supportant jusqu'à 100 M.A. sous 10 cm d'étincelle.

Le petit Coolidge à radiateur faisant soupape parfaite semble donc destiné de plus en plus à être le mo-

dèle universel adopté pour tous les besoins du radio-diagnostic.

On trouvera dans les articles de Dauvillier des renseignements plus détaillés sur les particularités très intéressantes de sa construction et de son fonctionnement.

Propriétés de l'ampoule. — Dans ce tube, à l'encontre de ce qui a lieu dans les ampoules à gaz raréfié, le réglage de l'intensité et du pouvoir pénétrant des rayons X est indépendant ; le rayonnement X, émis, peut subir, à volonté, des variations en qualité et en quantité.

Nous aurons à déterminer les conditions du réglage et les limites de cette indépendance, mais nous ne saurions trop insister sur cet avantage qui est des plus précieux. Il permet, en effet, sans autre procédé que le déplacement de deux manettes, de passer d'une extrême à l'autre et cela presque instantanément, de la radioscopie de l'estomac à celle des sommets pulmonaires, de la radioscopie à la radiographie rapide et inversement.

La pénétration moyenne du faisceau de rayons X peut être modifiée à volonté puisqu'elle est liée à la vitesse des rayons cathodiques, dépendant de la différence de potentiel aux bornes, variable à volonté.

L'intensité du rayonnement X étant liée à l'intensité du faisceau cathodique, elle-même dépendant uniquement, en principe, de la température du filament cathode, peut aussi, dans certaines limites, varier avec la différence de potentiel aux bornes du tube.

Le filament étant porté à une température déterminée, lorsqu'on fait croître progressivement la différence

de potentiel entre le filament et la plaque (fig. 2), l'intensité du courant, qui n'obéit pas à la loi d'Ohm I

$= \frac{E}{R}$, croît d'abord, puis se fixe à une valeur constante, lorsque le potentiel de la plaque est assez élevé pour qu'elle capte tous les électrons réunis. Le courant constant alors observé prend le nom de *courant de saturation*. Ceci est comparable en somme au phénomène de saturation qui se produit dans les gaz, lorsque la cause ionisante restant constante, la force électro-motrice croît.

Langmuir a montré qu'avant la saturation, l'intensité i du courant est proportionnelle à la puissance $\frac{3}{2}$ de la différence de potentiel entre la plaque et le filament, et s'exprime par une relation de la forme

$$(1) \quad i = A. 10^{-5} \frac{l}{d} v^{\frac{3}{2}}$$

où i est en ampères, v en volts, l étant la longueur du filament, d son diamètre et A une constante voisine, d'après des déterminations expérimentales de 2,5.

Tant que le courant de saturation n'est pas atteint, le nombre d'électrons qui peut être émis par le filament est supérieur à celui qui attire la plaque. Le filament est entouré d'électrons et l'action qu'exercent leurs charges négatives limite l'émission au nombre d'électrons qui sont enlevés par la plaque. Lorsqu'au contraire le courant de saturation est atteint, tous les électrons qui peuvent être émis sont attirés vers la plaque dès leur émission. Pour les faibles différences de potentiel, dans le premier cas (avant saturation), l'intensité de courant dépend donc de la différence de potentiel, et non de la température du filament, tan-

dis que dans le second cas (à saturation), comme le nombre des électrons augmente beaucoup avec la température du filament, on obtient un courant de saturation indépendant de la différence de potentiel mais d'intensité croissant avec la température du filament.

L'intensité du courant de saturation qui croît beaucoup lorsqu'on chauffe plus fortement le filament s'exprime par la formule de Richardson

$$(2) i = a \sqrt{T e} - \frac{b}{T}$$

où T est la température du filament, a et b des para-

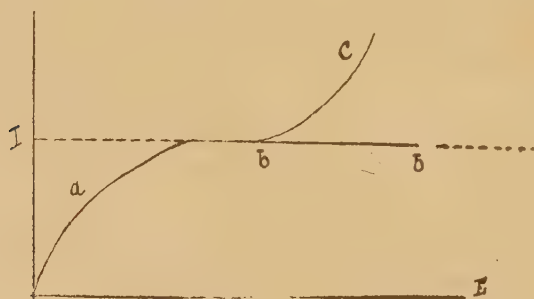


Fig. 6.

mètres dépendant des dimensions et de la nature du filament.

Le tube Coolidge comparé à ceux de Crookes présente donc entre autres, cette différence qu'à une température donnée du filament, après les deux premières phases (accroissement de l'intensité avec la différence de potentiel, a — fig. 6) — constance de l'intensité pendant que la différence de potentiel croît — b), il n'y en a plus une troisième liée à l'accroissement de la tension comme dans les cas de gaz où après la phase de constance, il y a encore une autre d'aug-

mentation, c. Cette nouvelle phase est due à ce que dans les tubes à gaz raréfié, les électrons choquent en cours de route des molécules gazeuses et les disloquent en formant des ions et des électrons (ionisation) qui, transportant à leur tour les charges électriques, font croître l'intensité (Townsend).

Donc, avec une différence de potentiel constante aux bornes, en faisant varier la température de la cathode, l'intensité du rayonnement X variera sans modification de sa pénétration. Il en découle qu'inversement, après captage de tous les électrons par l'anode, il est impossible d'élever l'ampérage excepté par augmentation de la température du filament cathode.

D'après Boll et Mallet (1), les variations de l'intensité du rayonnement X ne constituent pas une fonction simple de celles de l'intensité du courant électronique. L'intensité du rayonnement croît d'abord avec elle, passe par un maximum puis décroît. C'est ainsi qu'avec 4 cm. d'étincelle équivalente l'intensité du rayonnement est cinquante fois plus petite pour 35 milliampères que pour 5 milliampères. Ces données ne sont valables que si on use d'un dispositif genre contact tournant ancien modèle, par exemple, où l'on marche sur le rhéostat du primaire, et non avec un dispositif quelconque du modèle Bedside-Gallot (voir page 78), où il n'y a pas chute de voltage au niveau d'un rhéostat. Quant à l'intensité correspondant au maximum, elle varie avec le voltage.

Avec une température constante à la cathode, si la différence de potentiel augmente, l'intensité croît d'abord jusqu'à une certaine limite puis demeure cons-

(1) Boll et Mallet, *Paris Médical*, n° 43, 1917.

tante tandis que la pénétration du rayonnement X continue à croître l'intensité restant la même.

Du rayonnement X du tube Coolidge. — On a pensé un moment que le rayonnement X émis par un tube Coolidge devait être simple, monochromatique. En réalité, si la moyenne du degré de pénétration et l'intensité des rayons X y demeurent constantes, le faisceau X n'en est pas moins complexe. Il n'y a aucune différence à ce point de vue entre les ampoules de Crookes et celle-ci, et la raison en est en ce que dans les deux le faisceau cathodique est complexe, hétérogène.

Le spectre obtenu (De Broglie) est celui du tungstène et comparable à celui de l'anticathode de même métal d'une ampoule à air.

PARALLELE ENTRE LE TUBE COOLIDGE ET LES AMPOULES A GAZ RAREFIE

Si, en manière de synthèse et pour conclure, l'on vient à établir une parallèle entre le tube Coolidge et les ampoules ordinaires on s'aperçoit que des avantages considérables sont en faveur du premier.

1° *La constance de son fonctionnement.* — Après qu'elle a été réglée pour donner un rayonnement qualitativement et quantitativement déterminé, il donne ce rayonnement sans autres variations que celles qui proviennent du secteur urbain, pendant un temps pratiquement indéfini.

2° *La souplesse de son fonctionnement.* — On peut dans un très court espace de temps, par une série de ré-

glages pour ainsi dire instantanés, lui faire donner successivement toute une gamme de rayonnements très divers au double point de vue qualitatif et quantitatif.

C'est un avantage précieux pour l'exploration radiologique. Il permet de passer rapidement et facilement avec la même ampoule, de la radioscopie des sommets pulmonaires à celle de l'estomac, de la radioscopie à la radiographie rapide et inversement.

3° *La possibilité d'émettre des rayons pénétrants, en plus grande quantité que les ampoules à air raréfié, pour une même différence de tension entre les deux électrodes.*

C'est un avantage appréciable en radiothérapie, surtout en radiothérapie profonde. Il permet d'abréger la durée des séances tout en donnant les mêmes doses.

On a dit que les ampoules Coolidge à l'inverse des ampoules à air raréfié donnent un rayonnement homogène. C'est une erreur ; elles donnent toujours, comme les ampoules à air raréfié, un mélange plus ou moins complexe de rayons inégalement pénétrants.

On a dit aussi que comparés avec les ampoules à air raréfié, dans les mêmes conditions électriques d'intensité du courant et de différence de tension entre les deux électrodes, les tubes Coolidge émettent une plus grande quantité de rayons X, ce n'est vrai, et l'expérience le montre (M. Becquère) que si on les compare aux ampoules à air raréfié dont l'anticathode est refroidie ; par exemple aux ampoules du type Pilon. Mais ce n'est plus vrai si on les compare aux ampoules à air raréfié dont l'anticathode devient incandescente, par exemple aux ampoules Villard du type Thurneysen. Le rendement de ces dernières est au moins égal à celui des ampoules Coolidge.

Enfin les ampoules Coolidge offrent un dernier avantage, celui d'être perméable au courant de haute tension seulement quand la tension négative est du côté de la cathode, en d'autres termes de n'être perméables au courant de haut potentiel que dans un sens déterminé, toujours le même ; bref, de se comporter comme des soupapes électriques parfaites. C'est toutefois à la condition que la température de l'anticathode ne s'élève pas au point que celle-ci émette, comme la cathode, des électrons.

Ainsi quand une ampoule Coolidge est reliée à un transformateur avec commutateur à contact tournant on peut supprimer ce dernier tant que l'intensité du courant qui traverse l'ampoule ne dépasse pas l'intensité couramment employée en radioscopie, mais si on veut passer de la radioscopie à la radiographie rapide, et par suite atteindre de plus hautes intensités, il devient nécessaire, pour éviter le passage de l'onde inverse dans le mauvais sens au travers de l'ampoule, de rétablir le commutateur à contact tournant.

C'est devant cette nécessité de posséder un tube robuste et souple que Coolidge a voulu établir en même temps qu'un appareil simple, un type de tube à vide faisant soupape parfaite dans les limites de sa puissance et a créé en particulier pour le radiodiagnostic un tube avec foyer très fin : le Baby Coolidge.

Les ampoules Coolidge ne donnent pas de meilleures images radioscopiques ou radiographiques que les ampoules à gaz raréfié. Leur substitution à ces derniers ne facilite nullement l'interprétation des images de Roentgen ne diminue en rien les difficultés proprement dites du radiodiagnostic.

Mais l'emploi des tubes à vide simplifie et facilite

très notablement la technique de la radioscopie et de la radiographie. Il met cette technique, pour ainsi dire sans apprentissage, à la portée de tous les médecins et contribue sans aucun doute à la vulgarisation de plus en plus grande, de l'exploration radiologique.

En radiothérapie, la substitution des ampoules à vide aux ampoules à gaz raréfié, permettra d'obtenir en plus grande quantité des rayons pénétrants, des rayons de plus en plus pénétrants, à mesure qu'on construira de nouveaux transformateurs, capables de fournir des tensions plus élevées, de 100.000, de 150.000 volts, peut-être même au-dessus.

Ces transformateurs sont nécessairement plus lourds, plus encombrants, plus coûteux. Ils permettront à la radiothérapie de devenir plus puissante, plus rapidement et plus profondément efficace, mais ils la rendront en même temps plus dangereuse à la fois pour les malades et pour leurs médecins.

Cette radiothérapie perfectionnée demeurera donc, on peut le prévoir, entre les mains de spécialistes expérimentés, tandis que peut-être un jour viendra où tous les médecins pratiqueront, plus ou moins bien, l'exploration radiologique, comme ils pratiquent tous aujourd'hui l'auscultation et la percussion.

Le radiodiagnostic, qui n'est qu'une partie du diagnostic sans épithète, n'en demeurera pas moins pour le clinicien non pas un acte mécanique, mais une œuvre de jugement, exigeant beaucoup de savoir et d'expérience.

V.

Excitation de l'ampoule. — Les appareils actuellement employés pour l'excitation de l'ampoule à gaz raréfié sont soit des bobines, soit des transformateurs proprement dits.

Dans les premières, le courant du secteur est d'abord périodiquement interrompu par un interrupteur, le plus souvent à turbine, et l'adjonction des soupapes met le tube à l'abri du danger de l'onde inverse.

Les transformateurs proprement dits sont représentés par le type dit à « contact tournant » dont il existe plusieurs modèles. Dans ces appareils, le courant alternatif est en général admis directement dans le transformateur, sans adjonction d'interrupteur, et le système de contact tournant est réglé de façon à ne laisser passer qu'une seule onde dans l'ampoule, l'autre étant supprimée ou redressée.

Toutes ces installations, adaptées pour le courant continu ou alternatif, peuvent être utilisées à l'excitation des tubes à vide parfait, mais il est nécessaire de leur adjoindre une source électrogène auxiliaire fournissant le courant de chauffage de la cathode et, quand cela est nécessaire, une ou plusieurs soupapes.

A) *Chauffage de la cathode*. — Le courant du chauffage peut être fourni soit par des accumulateurs (modèle Pilon), soit par un petit transformateur réducteur (modèle Gaiffe).

Dispositif Pilon. — Les accumulateurs, au nombre de six et d'une capacité de 40 ampères-heures, sont enfermés dans une boîte isolée sur des pieds de porcelaine. Sur une des faces de la boîte se trouvent d'un côté, l'ampèremètre, de l'autre, le voltmètre, et entre les deux, en haut, la prise de courant, destinée à les relier à la cathode de l'ampoule ; au centre, un anneau qui commande le contact d'un rhéostat circulaire. Une longue tige de bambou, accrochée à cet anneau, permet de faire varier la résistance qui modifie l'intensité du courant traversant la spirale de tungstène dont la température oscille aux environs de 2000° absolus. Un simple mouvement de traction sur l'anneau établit ou interrompt le courant. On a tendance actuellement à délaisser ce mode de chauffage.

Dispositif Gaiffe. — Autour d'un noyau magnétique est enroulé le primaire alimenté par un courant alternatif à basse tension. Le circuit secondaire qui entoure le primaire en est séparé par un petit espace et l'ensemble est noyé dans un isolant pâteux de façon à obtenir entre les deux circuits un isolement suffisant pour résister à la haute tension à laquelle se trouve portée la cathode du tube.

Les connexions avec celle-ci se font par l'intermédiaire d'un fil souple partant des extrémités de l'enroulement secondaire situé à la partie moyenne et sur la face convexe de la bobine.

B) *Soupapes*. — De même que les propriétés du tube de Crookes ont servi de base à la confection de soupapes pour la protection de l'ampoule radiogène, le principe même de la cathode chauffante a donné lieu à la réalisation d'une soupape : le kenotron, possédant les mêmes avantages sur les soupapes à air que le tube de ce modèle sur ceux de Crookes. On peut dire en somme que le kenotron est pour le Coolidge ce que la soupape Villard a été pour les tubes à gaz raréfié.

Soupape Kenotron. — Le kenotron est, somme toute, une ampoule de Coolidge avec même degré de vide et même construction. Il se place en série comme les soupapes Villard ou Pilon et ne fonctionne que dans un seul sens. Il nécessite un dispositif de chauffage indépendant de celui du tube et il en faut un par soupape. Le refroidissement est à ailettes.

Ce qui le différencie du tube radiogène proprement dit c'est un dispositif particulier des électrodes ; la cathode se trouve engainée par l'anticathode. C'est en vue de protéger le filament cathode contre les attractions électrostatiques qu'on a été amené à adopter ce dispositif.

TRANSFORMATEURS NOUVEAUX

La supériorité des nouveaux appareils que les Américains ont été les premiers à construire et ce grâce à la possession du Baby Coolidge, tient à la suppression de tout mécanisme mobile. Ces appareils emploient directement le courant alternatif. Si on ne dispose que d'un courant continu, il faut avoir recours à une commutatrice qui sera le seul mécanisme mobile.

Transformateur Bedside-Unit. — Dans le modèle Bedside-Unit, le premier du genre, le circuit magnétique est fermé et le primaire constitué d'un gros fil B est traversé directement par le courant alternatif du secteur, commandé par un commutateur C ; une lampe à incandescence L sert de témoin (fig. 7).

Le secondaire B', formé d'un enroulement de fil très fin et très long est simplement juxtaposé au pri-

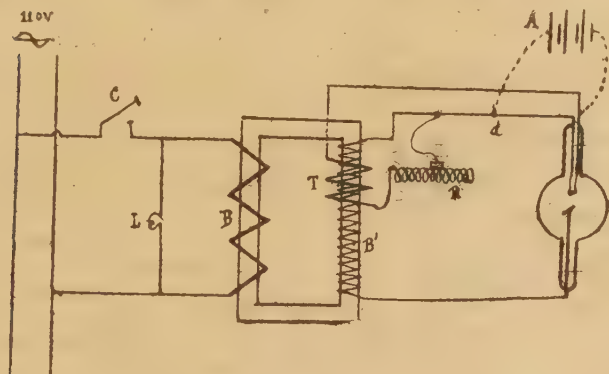


Fig. 7.

maire et se met directement en connexion avec les bornes du tube.

Le courant de chauffage provient soit d'une batterie d'accumulateurs ou d'un transformateur à part, A — soit d'un transformateur réducteur T, formé d'un enroulement de gros fil sur une partie du secondaire ; une résistance R. règle en ce cas son intensité. Avec ce dernier dispositif le circuit est d'ailleurs simplifié par l'utilisation, comme fil de retour de la basse tension, du fil négatif à haute tension auquel est connecté en d la sortie négative du transformateur réducteur de potentiel.

Ce premier appareil a subi quelques heureuses mo-

difications. Dans les modèles actuels, la résistance R est remplacée par un self dont le déplacement du noyau permet de modifier l'intensité du courant électrique. Pour mesurer l'intensité du courant, enfin, un milliampèremètre M est disposé au point mort sur le secondaire (comme fig. 8 et 9).

Le Bedside Unit tel qu'il est ou modifié est à tension (45.000 v. environ) et pénétration constantes.

Transformateur Bedside-Gallot (1). — Pour avoir un appareil à pénétration et par conséquent voltage va-

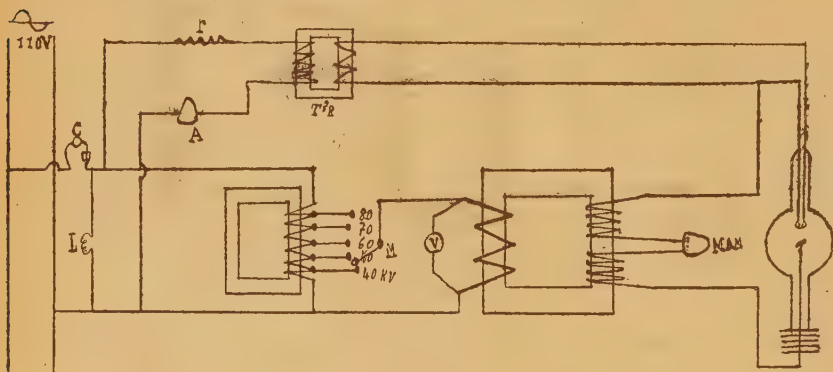


Fig. 8.

riables, Gallot a imaginé les modifications nouvelles suivantes :

L'alternatif du secteur passe par un auto-transformateur dont les enroulements sont connectés à cinq plots isolés qui correspondent à 40, 50, 60, 70 et 80 Kv. maxima. Une manette M permet de passer au plot voulu et de régler à volonté par conséquent la tension dans les limites indiquées. Dans la réalisation pratique, un dispositif de boutons à contact fournit toutes

(1) *Bulletin soc. Rad. de France*, n° 58, avril 1919. p. 20.

les gradations intermédiaires. Un voltmètre V, au primaire est étalonné en kilovolts conformément au coefficient de transformation et suivant la technique habituelle dans l'industrie et permet de contrôler la tension.

Le secondaire est identique à celui du meuble précédent et comporte un milliampermètre.

Le transformateur de chauffage du filament enfin T²R est distinct, une résistance r permet le réglage et un ampèremètre A mesure l'intensité du courant électronique.

Plus puissant que le Bedside-Unit primitif, ce meuble peut fournir une vingtaine de milliampères et une échelle de pénétration très suffisamment étendue pour tous les besoins du radiodiagnostic et de la radiothérapie courante.

Transformateur Drault-Rollot-Lapointe. — Le dernier venu de ces appareils sans mécanisme mobile est celui que la maison Drault vient de mettre au point.

Le courant alternatif du secteur passe directement dans le primaire P du transformateur qui est à circuit magnétique fermé. Sur le secondaire S se trouve un contact à boutons dont la manette M placée sur un cadran gradué donne le degré de pénétration en degrés radiochromométriques Benoist de 5° à 7-8°, correspondant à des voltages de 45.000 à 70.000 volts. D'autre part, sur le fil négatif de ce circuit à haute tension est disposé un milliampermètre M.A.M. fonctionnant sur un petit transformateur réducteur T.

Le transformateur fournissant le courant de chauffage est ici encore indépendant. Le courant du secteur admis dans le circuit à l'aide d'un interrupteur I passe par un rhéostat R de réglage puis traverse l'enroule-

ment de fil fin. L'enroulement réducteur, juxtaposé à celui-ci se met en connexions avec la cathode d'une part à l'aide d'un fil indépendant et d'autre part par le fil négatif de haute tension.

Ces différentes parties de l'appareil sont contenues dans un meuble peu encombrant de 90 c. de haut sur 85 cm. de côté.

Pour le cas du courant continu, une petite commutatrice peut être logée dans le socle du meuble.

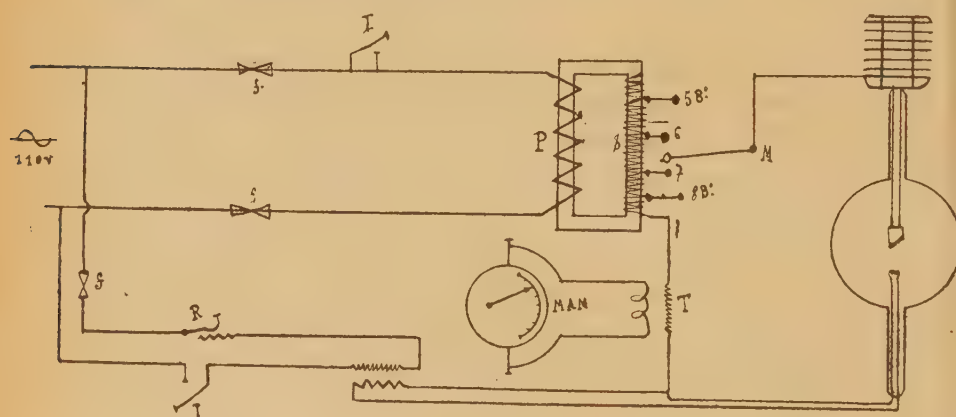


Fig. 9.

Sur la plaque de marbre se trouvent :

1° Deux fusibles pour la protection des deux transformateurs destinés l'un au chauffage, l'autre, au circuit de l'ampoule ;

2° Deux interrupteurs, l'un sur le circuit de chauffage, l'autre sur le circuit de l'ampoule ;

3° Deux commandes de réglage dites commande d'intensité et commande de pénétration, la première réglant le chauffage et par conséquent l'intensité du courant de haute tension de laquelle dépend l'intensité du

rayonnement X, la seconde indiquant le pouvoir de pénétration des rayons X par le réglage de la tension électrique aux bornes du tube.

4° Un milliampèremètre à cadran lumineux relie au circuit de l'ampoule.

Le réglage de l'intensité est ainsi rendu indépendant du réglage du pouvoir pénétrant.

Pour mettre l'appareil en marche, d'après ce que nous savons de la mise en marche des tubes à vide, il faut fermer successivement le circuit de chauffage et le circuit de l'ampoule en abaissant d'abord la clef du petit interrupteur puis celle du gros interrupteur.

Cet appareil s'adapte spécialement à l'ampoule Coolidge Radiateur, celle qui fait elle-même office de soupape et qui est destinée surtout à la radiographie et radioscopie.

Le modèle actuellement mis au point peut fournir jusqu'à 25 milliampères. Pratiquement la petite ampoule Coolidge à radiateur, employée pour la radioscopie, c'est-à-dire fonctionnant en régime continu, ne doit supporter qu'un débit de 1,5 à 2 milliampères.

Pour la radiographie rapide, elle est capable de supporter 10 milliampères pendant 30 à 45 secondes. Il est enfin possible, sans endommager l'anticathode, de faire traverser l'ampoule pendant une seconde par un courant de 20 milliampères. Dans ce dernier cas, les constructeurs recommandent, pour éviter de dépasser le délai permis, de ne pas couper le courant à l'aide d'un interrupteur mais d'un fusible étalonné qu'ils fournissent et dont la fusion demande exactement une seconde.

Le meuble Drault se différencie en somme de celui de Gallot par la position différente de la commande du courant de haut voltage. Tandis que dans ce dernier

le réglage se fait sur le primaire, dans le premier il se fait sur le secondaire. Le réglage sur le secondaire est bien plus sensible et par là même plus difficile ; il faut un peu de tâtonnement pour amener l'aiguille du milliampèremètre au chiffre voulu.

Dans tous ces meubles où deux transformateurs et plusieurs fils conducteurs se trouvent près les uns des autres, un isolement parfait est indispensable, sinon il se produit entre eux, comme nous avons eu l'occasion

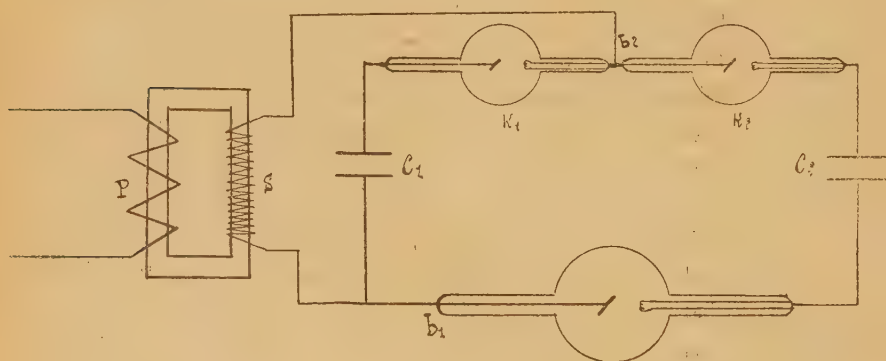


Fig. 10.

de l'observer, des éclats d'étincelles qui, en se répétant, risquent de détériorer l'appareil.

La réalisation du kenotron enfin, qui est une soupape parfaite, a donné lieu à des recherches en vue de la construction d'un transformateur nouveau, genre meuble d'Arsonval-Gaiffe.

M. Pilon étudie, croyons-nous, un dispositif qui aurait les principales caractéristiques suivantes : le primaire, pareil à celui des précédents meubles, aurait un voltmètre industriel, un ampèremètre et un rhéostat pour le réglage du courant alternatif provenant du secteur. Le secondaire aboutirait d'une part en b^1 direc-

tement à l'un des pôles du tube et d'autre part en b^2 se mettrait en connexions avec deux kénotrons k^1 et k^2 disposés en sens inverse. Chaque onde passant par l'une des soupapes viendrait charger un condensateur C^1 et C^2 , dont l'un, C^1 , se met en connexion avec l'antécathode, et l'autre, C^2 , avec la cathode. De la sorte les deux condensateurs fonctionneraient en somme comme deux réservoirs se remplissant périodiquement et aux dépens desquels on alimenterait le tube ; la différence de potentiel aux bornes de celui-ci étant égale au double de la tension existant entre les plateaux de chaque condensateur. Cet appareil nécessiterait, en plus de celle de l'ampoule, autant de sources indépendantes de courant de chauffage qu'il y aurait de kénotrons.

* * *

En résumé, ces appareils sans mécanisme mobile, jouissent de qualités de souplesse et de rendement, de facilités de maniement, de commodité et de simplicité enfin, que l'on chercherait en vain dans toute autre installation.

CONCLUSIONS

La substitution des ampoules à vide parfait aux ampoules à gaz raréfié s'impose, en premier lieu : à cause de l'avantage considérable qu'elles offrent de permettre *un réglage indépendant*, et cela dans des limites assez étendues, *de l'intensité et du pouvoir pénétrant des rayons X*.

En second lieu par :

A. La constance de leur fonctionnement ;

B. La souplesse de leur fonctionnement ;

C. La possibilité d'émettre des rayons pénétrants, en plus grande quantité que les ampoules à air raréfié, pour une même différence de tension entre les deux électrodes.

On a grand avantage à se servir des transformateurs nouveaux, sans mécanisme mobile, pour l'excitation de ces ampoules. Ces appareils concourent, quoique à un moindre degré que le tube radiogène lui-même, à la grande simplification de la technique radiologique résultant de l'emploi de ce nouvel outillage.

BIBLIOGRAPHIE

- J. BARNES. — Le spectre de haute fréquence du tungstène.
— *Philosophical Magazine*, 1915, n° 177.
- BELOT et M. MÉNARD. — De l'emploi du tube coolidge dans les applications médico-chirurgicales des rayons X. C. R. Ac. Sc., 6 avril 1915.
- BOLL et L. MALLET. — Détermination des constantes pratiques du tube coolidge, C. R. Ac. Sc., 25 sept. 1916.
- BROGLIE (Maurice de). — La nature des rayons X et leurs spectres. *Soc. de Rad. Med.*, avril 1914.
- BROGLIE (Maurice de). — Sur la bande d'absorption K des éléments pour les rayons X suivis du brome au bismuth et l'émission du tube coolidge vers les très courtes longueurs d'onde. C. R. Ac. Sc., 24 juillet 1916.
- BROGLIE (Maurice de). — Sur un système de bande d'absorption correspondant aux rayons L des spectres de rayons X des éléments et sur les phénomènes d'absorption selective en radiographie. C. R. Ac. Sc., 9 octobre 1916.
- H.-E. COLWELL, D. P. H. et S. RUSS. — Radium, X rays. and living cell.
- WEELER, P. DAVEY. — The X rays. General electric company's publication bureau. XVIII. avril-mai-juin 1915. Tirage à part 1915.
- GUILLEMENOT. — Les nouveaux horizons de la science.
- GUILLEMENOT. — Rayons X et radiations diverses.
- GUILLEMENOT. — Diffusion des rayons X de l'organisme,

- nature des rayons de Sagnac. *Soc. de Rad. Med.*, avril-mai, 1911.
- A.-W. HULL. — Le spectre de rayons X du tungstène. *Arch. of Radiology and electrotherapy*, janvier 1917.
- R. KNOX. — Discussion sur le tube coolidge, *Proceedings of Roy. Soc. of Med.* IX, n° 6, avril 1916.
- PILON. — Propriétés du rayonnement du tube coolidge.
- RUTHERFORD (sir E.), BARNES et H. RICHARDSON. — Sur la fréquence maxima des rayons X émis par un tube coolidge à différents voltages; *Phil. Mag.* 1915, n° 177.
- L. SICILIANO. — Observations sur le tube coolidge. *La Radiologia Medica* III, 9-10 sept.-oct., 1916.
- TEILLARD. — Notes sur la technique du tube coolidge. *Arch. d'Electricités Médicale*, août 1916.
- VILLARD. — Rayons cathodiques, *Scientia*, mars 1908.
- A. WEIL. — Les progrès de la Radiologie, *Paris Médical*, 2 juin 1917.
-

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION.	9
CHAPITRE I. — Étude de la décharge dans les gaz raréfiés.	
— Rayons cathodiques.	11
Ampoule de Crookes.	18
CHAPITRE II. — Étude des rayons X, leurs propriétés. . . .	21
CHAPITRE III. — Transformations et perfectionnements suc-	
cessifs de l'ampoule de Crookes.	42
Son perfectionnement.	46
CHAPITRE IV. — De la cathode incandescente.	
Effet Edison.	49
Tube Lilienfeld.	51
Tube Coolidge.	55
Théorie du fonctionnement.	58
Aspect du tube.	60
Étude électrique du tube.	62
Propriétés du tube.	66
Du rayonnement X du tube.	69
Parallèle entre les ampoules à gaz raréfié	
et le tube Coolidge.	70
CHAPITRE V. — De l'excitation des ampoules.	74
Dispositifs de chauffage de la cathode. . . .	75
Transformateurs nouveaux.	76
« « Bedside-Unit.	77
« « Bedside-Gallot.	78
« « Drault-Rollot-Laponite.	79
« « Pilon.	82
CONCLUSION.	85
BIBLIOGRAPHIE.	87



10

THÈSE
POUR
LE DOCTORAT EN MEDECINE

